



**Carla Merícia Monteiro Tavares**

Licenciada em Engenharia Mecânica

## **Influência da Força de Aperto na Minimização do Dano em Furação a Alta Velocidade em Materiais Compósitos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Carla Maria Moreira Machado, Prof. Auxiliar,  
FCT, UNL

Co-orientador: Jorge Joaquim Pamies Teixeira, Prof.  
Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor: Rosa Maria Mendes Miranda

Arguentes: Prof. Doutor: Telmo Jorge Gomes dos Santos

Vogais: Prof. Doutor: Carla Maria Moreira Machado

Prof. Doutor: Jorge Joaquim Pamies Teixeira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2013**



**Influência da Força de Aperto na Minimização do Dano em Furação a Alta Velocidade em materiais Compósito**

Copyright © 2013 Carla Merícia Monteiro Tavares, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus amados Pais*



# Agradecimentos

Durante a minha formação universitária, a viver num país estrangeiro e longe dos meus familiares e amigos, tive a ajuda de pessoas que hoje são muito importantes na minha vida, pessoas que de forma directa e indirectamente ajudaram para que seja possível a realização deste trabalho. A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho o meu muito obrigado, em especial:

A professora Carla Machado pela oportunidade de realizar este desafiante trabalho, assim como a colaboração dada para a elaboração deste relatório, pela paciência para a correcção do mesmo e pela disponibilidade aprestada para ajudar na sua elaboração.

Ao professor Jorge Pamies Teixeira, queria agradecer pela ajuda dada na realização da componente prática que sem essa ajuda esse trabalho não seria o mesmo, pelos esclarecimentos dados ao longo do mesmo e pelo apoio, disponibilidade e interesse no desenvolvimento do mesmo, e pela amizade demonstrada ao longo desses anos.

Um muito obrigado ao Sr. António Campos e Paulo Magalhães por toda a assistência técnica, ajuda durante a realização do trabalho experimental. Aos meus professores pela amizade demonstrada e conselhos dados durante o meu percurso curricular que ajudaram a ultrapassar muitas barreiras.

Aos amores da minha vida que são os meus pais que me apoiaram sempre em todos os momentos e de várias formas, que nunca me deixaram desistir e que me ajudaram a realizar um sonho, e pelo amor incondicional. Agradeço também aos meus irmãos que cada um da sua forma ajudaram a enfrentar a vida fora do meu país, com conselhos sábios e palavras carinhosas, e a minha sobrinha que me enche de alegria.

Um especial obrigado ao Cláudio, por me acalmar nos momentos de frustração, pelo apoio moral pela compreensão e carinho durante todos estes anos, e pela motivação na realização deste trabalho. Aos meus amigos e colegas da faculdade e em especial ao Jorge e as minhas meninas e companheiras Anaine, Zuleica, Suely, Annica e Carla pelos momentos de distracção, palavras encorajadoras e companhia durante estes anos.





# Resumo

A utilização industrial dos materiais compósitos reforçados com fibra de carbono tem vindo a aumentar devido à combinação das suas características específicas, como elevada rigidez e baixo peso. De modo a efectuar a ligação entre componentes produzidos neste tipo de materiais recorre-se normalmente ao processo de furação. O dano mais importante que ocorre devido a este processo é a delaminação, provocada pela acção da força axial e que tem influência directa na resistência do material. A utilização de aperto na fixação das peças no processo de furação pode diminuir a ocorrência da delaminação, logo o aprofundamento do conhecimento relativo a este assunto revela-se importante devido à necessidade de minimização do dano.

Neste trabalho pretende-se definir uma nova técnica e consequentemente, uma metodologia para a sua aplicação com o propósito de diminuir o dano de delaminação que ocorre no processo de furação a alta velocidade de peças em materiais compósitos reforçados com fibra de carbono. O conjunto de valores dos parâmetros do processo foi definido com base na literatura consultada e tendo como propósito cobrir uma gama relativa à condição de alta produtividade. Desenvolveu-se ainda um sistema de fixação para ser possível o controlo do aperto dos provetes de três espessuras diferentes nos vários ensaios de furação realizados para diferentes condições.

Com o resultado dos ensaios realizados foi possível verificar a influência do aperto na ocorrência da delaminação durante o processo de furação a alta velocidade, a força de aperto. Provou diminuir a ocorrência do dano com as três espessuras diferentes. A maior redução do dano foi registada quando se utilizou força de aperto de 4 kN, independentemente da espessura do material. A força de aperto a partir de 6 kN demonstrou ser excessiva provocando deformação no material. Foram ainda estudadas a influência dos parâmetros de corte e a sua variação onde observou-se que a influência da velocidade de rotação não é evidente na redução do dano, o avanço por dente influencia o dano mas esta influencia varia com a espessura do material. O estudo da força axial de corte Também foi efectuada onde verificou-se que este é fortemente dependente do avanço por dente e não depende da força de aperto aplicada.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos; Fibra de carbono; Furação de alta velocidade; Força de aperto; Delaminação



# Abstract

The industrial use of carbon fibre reinforced composite materials has been increasing mainly due to the combination of its specific characteristics, such as high stiffness and low weight. In order to assembly components in mechanical structures, the holes for fastening are usually obtained by the drilling process. From the problems arising from drilling, delamination is the most important damage. This is caused by the action of thrust force and has a direct influence on the resistance of the material. The application, by the fixing system, of the compressive force on the periphery of the drilled area can result in a reduction of the delamination damage. Thus, the deepening of the knowledge regarding this matter proves to be important because of the need for damage minimization.

This work aims to define a new technique and consequently, a methodology for its application in order to reduce the delamination damage that occurs when the high speed drilling process is used in carbon fibre reinforced materials. The set of values of the process parameters were defined based on the literature and with the purpose to cover a range concerning the condition of high productivity. A fixing system was also developed in order to control the compressive force on the specimens in the various tests conducted for different conditions.

As a result of the tests it was possible to investigate the influence of tightening the periphery of the hole on the occurrence of delamination during the high speed drilling process and establish a range of acceptable compressive force values for this operation. A further reduction of damage was recorded when using the clamping force of 4 kN, regardless of the material thickness. The clamping force from 6 kN demonstrated to be causing excessive strain on the material. We also studied the influence of cutting parameters and the variation observed that where the influence of the rotation speed is not evident in reducing damage, the feed per tooth damage but this influences the influence varies with the thickness of the material. The study of axial cutting force was also carried out where it was found that this is highly dependent on the feed per tooth and is independent of the tightening force applied.

**Keywords:** Composite Materials; Carbon Fibre; High Speed Drilling; Compressive Force; Delamination



# Índice de Matérias

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE MATÉRIAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IIX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XIIII</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 OBJECTIVOS E TRABALHOS REALIZADOS .....	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE .....	3
<b>2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS .....	5
2.2 PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS FUROS.....	7
2.3 DELAMINAÇÃO PROVOCADA PELA OPERAÇÃO DE FURAÇÃO.....	11
2.4 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	13
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>17</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	17
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA FURAÇÃO DAS PLACAS .....	17
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS .....	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
3.4 FERRAMENTAS E PARÂMETROS DE CORTE.....	21
3.5 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGEM .....	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>51</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	51
5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	53
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>74</b>



# Índice de Figuras

Figura 2.1- Aplicações de materiais compósitos.....	5
Figura 2.2- Imagem detalhando a configuração <i>plain weave</i> .....	6
Figura 2.3- Geometrias de ferramentas utilizadas na furação de materiais compósitos.....	8
Figura 2.4- Delaminação: a) à entrada ( <i>peel-up</i> ); b) à saída ( <i>push-out</i> ).....	11
Figura 2.5- Caracterização do dano segundo <i>Chen</i> .....	12
Figura 2.6- Caracterização do dano segundo <i>Davim</i> .....	13
Figura 2.7- Alguns defeitos típicos dos materiais compósitos.....	14
Figura 2.8- Esquema de funcionamento da radiografia convencional.....	15
Figura 2.9- Radiografia digital dos danos devidos à furação em CFRP.....	16
Figura 3.1- Centro de maquinagem CNC.....	17
Figura 3.2- Sistemas de fixação utilizados na furação das placas.....	18
Figura 3.3- Sistema de fixação das placas.....	19
Figura 3.4 - Sistema de aquisição de dados.....	20
Figura 3.5 - Diferentes espessuras dos provetes utilizados.....	21
Figura 3.6- Broca helicoidal usada na componente experimental.....	21
Figura 3.7- Provette imerso durante um período de tempo demasiado elevado.....	23
Figura 3.8- Equipamento de análise radiográfica.....	23
Figura 4.1- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	25
Figura 4.2- Representação do dano ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	26
Figura 4.3- Redução percentual do dano para as diferentes velocidades com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	27
Figura 4.4- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	27
Figura 4.5- Representação do dano ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	28
Figura 4.6 - Redução percentual do dano para as diferentes velocidades com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	28

Figura 4.7- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ) .....	29
Figura 4.8- Representação do dano ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ).....	30
Figura 4.9- Redução percentual do dano para as diferentes velocidades com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ).....	30
Figura 4.10 – Redução percentual do factor de delaminação com o avanço por dente ( $e = 2 \text{ mm}$ ). 31	
Figura 4.11 - Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	32
Figura 4.12- Representação do dano ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	32
Figura 4.13- Imagem do dano provocado pelo esmagamento nos ensaios que utilizaram força de aperto de 8 kN ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ) .....	33
Figura 4.14- Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	34
Figura 4.15- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ) .....	35
Figura 4.16- Representação do dano ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	35
Figura 4.17- Imagem radiográfica e respectiva binarização ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ) .....	36
Figura 4.18- Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	36
Figura 4.19- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ) .....	37
Figura 4.20- Representação do dano ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ).....	38
Figura 4.21- Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ).....	38
Figura 4.22- Redução percentual do factor de delaminação com o avanço por dente ( $e = 4 \text{ mm}$ )... 39	
Figura 4.23- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ) .....	40
Figura 4.24- Representação do dano ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	41
Figura 4.25- Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ).....	41



Figura 4.26- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ) .....	42
Figura 4.27- Representação do dano ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	42
Figura 4.28- Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ).....	43
Figura 4.29- Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ) .....	43
Figura 4.30- Representação do dano ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ).....	44
Figura 4.31- Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ; $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ).....	44
Figura 4.32- Redução percentual do factor de delaminação com o avanço por dente ( $e = 6 \text{ mm}$ ) ..	45
Figura 4.33- Redução percentual do factor de delaminação com a espessura ( $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ; $S = 20\,000 \text{ rpm}$ ).....	46
Figura 4.34- Redução percentual do factor de delaminação com a espessura ( $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ) .....	47
Figura 4.35- Redução percentual do factor de delaminação com a espessura ( $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ; $S = 12\,000 \text{ rpm}$ ).....	48
Figura 4.36- Redução percentual do factor de delaminação com a espessura para os diferentes avanços.....	49
Figura 4.37- Comportamento da força axial com o avanço por dente .....	50
Figura A. 1- Sensores desenvolvidos .....	59
Figura D. 1- Redução percentual do dano com a variação do avanço para o provete de 2 mm. ....	74
Figura D. 2- Variação dos factores de delaminação e Força Axial para diferentes velocidades ao longo do aperto.....	75
Figura D. 3- Variação dos factores de delaminação e Força Axial para diferentes velocidades ao longo do aperto.....	76
Figura D. 4- Variação dos factores de delaminação e Força Axial para diferentes velocidades ao longo do aperto.....	77

Figura D. 5- Redução percentual do dano com a variação da espessura e avanço de 0.055 mm/dente .....	78
Figura D. 6- Redução percentual do dano com a variação da espessura e avanço de 0.0775 mm/dente com utilização da velocidade de rotação de 20 000 rpm. ....	78
Figura D. 7- Redução percentual do dano com a variação da espessura e avanço de 0.11 mm/dente com utilização da velocidade de rotação de 16 000 e 20 000 rpm. ....	79
Figura D. 8- Variação percentual do dano com a variação da espessura com utilização do avanço de 0.055 mm/dente .....	80
Figura D. 9- Variação percentual do dano com a variação da espessura com utilização do avanço de 0.0775 mm/dente .....	81
Figura D. 10- Variação percentual do dano com a variação da espessura com utilização do avanço de 0.0775 mm/dente .....	82

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Comparação dos END aplicáveis nos compósitos poliméricos .....	14
Tabela 3.1- Dados do momento introduzido na chave dinamométrica e tensão exercida nos provetes .....	20
Tabela 3.2- Propriedades físicas do laminado.....	21
Tabela 3.3- Dados dos ensaios experimentais.....	22
Tabela 5.1- Condição óptima de maquinagem estabelecida com a realização deste trabalho .....	52
Tabela B. 1- Dimensões nominais das porcas e parafusos.....	61
Tabela B. 2- Força e Momento de Aperto.....	61
Tabela C. 1- Resultados experimentais dos factores de delaminação e força Axial para o provete de 2 mm de espessura e avanço 0.055; 0.0775 e 0.11 mm/dente.....	63
Tabela C. 2- Resultados experimentais dos factores de delaminação e força axial para o provete de 4 mm de espessura e avanço 0.055; 0.0775 e 0.11 mm/dente.....	65
Tabela C. 3- Resultados experimentais dos factores de delaminação e força axial para o provete de 6 mm de espessura e avanço 0.055; 0.0775 e 0.11 mm/dente.....	67
Tabela C. 4- Variação percentual do dano para o aperto de 1 kN.....	69
Tabela C. 5- Variação percentual do dano para o aperto de 2 kN.....	70
Tabela C. 6- Variação percentual do dano para o aperto de 4 kN.....	71
Tabela C. 7- Variação percentual do dano para o aperto de 6 kN.....	72
Tabela C. 8- Variação percentual do dano para o aperto de 8 kN.....	73



# Nomenclatura

Os símbolos utilizados ao longo do trabalho são acompanhados dos respectivos significados. Contudo estes significados podem-se obter na lista abaixo apresentada no qual esta dividida em duas partes: Símbolos e siglas.

## Símbolos

$h$	Profundidade da ferramenta que não entra em contacto com o material (mm)
$G_{Ic}$	Resistência a fractura interlaminar do módulo I
$F_d$	Factor de delaminação
$F_{da}$	Factor de delaminação ajustado
$D_{max}$	Diâmetro máximo delaminado (mm)
$D_0$	Diâmetro do furo (mm)
$A_0$	Área nominal (mm <sup>2</sup> )
$A_d$	Área do dano (mm <sup>2</sup> )
$A_{dmáx}$	Área correspondente a $D_{max}$ (mm)
$d$	Diâmetro da ferramenta (mm)
$E$	Módulo de Elasticidade (Pa)
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$d_m$	Diâmetro médio (mm)
$l$	Passo real (avanço por rotação)
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\alpha$	Ângulo de rosca (°)
$\mu_c$	Factor de atrito na coroa
$d_c$	Diâmetro característico da coroa de atrito (mm)
$f_z$	Avanço por dente
$S$	Velocidade de Rotação (rpm)
$e$	Espessura do provete (mm)
$F_{crit}$	Força crítica para o início da delaminação (N)
$T_a$	Momento de Aperto (N/m)
$F$	Força de Aperto (N)

## Siglas

<b>END</b>	Ensaios Não Destrutivos
<b>NDT</b>	Nondestructive Testing
<b>CFRP</b>	Carbon Fiber Reinforced Polymer
<b>RX</b>	Raio-X
<b>OGMA</b>	Oficinas Gerais de Material Aeronáutico
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control
<b>US</b>	Ultra-Som
<b>DEMI</b>	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
<b>DAQ</b>	Sistema de Aquisição de Dados
<b>TIFF</b>	<i>Tagged Image File Format</i>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto e Motivação

Com o decorrer do tempo as tecnologias modernas têm exigido materiais com combinações incomuns de propriedades [1] que não podem ser satisfeitas pelos materiais mais conhecidos (metálicos, cerâmicos e poliméricos) [2]. De modo a atender as tais exigências surgiu a necessidade de modificar as propriedades ou comportamentos desses materiais tendo surgido materiais com características e propriedades capazes de satisfazer as novas exigências, de que são exemplo os materiais compósitos. Os materiais compósitos fazem parte de uma gama de materiais que são geralmente mais leves e mais resistentes do que todos os materiais anteriormente conhecidos [1]. Devido às suas características, os componentes obtidos a partir destes materiais são normalmente produzidos na sua forma final ou quase final. Tendo a necessidade de montá-los em estruturas, recorre-se habitualmente à operação de furação. Esta operação conduz à necessidade do desenvolvimento de novas ferramentas e estratégias de corte [3].

A operação de furação causa danos nos materiais, especialmente em volta da periferia do furo efectuado tanto na entrada como na saída. Os defeitos mais frequentes são a delaminação (essencialmente à entrada e/ou saída), as fissuras interlaminares, o descolamento fibra/matriz, o arrancamento das fibras e os danos térmicos [3, 4]

O dano mais importante é a delaminação uma vez que este pode limitar a duração do componente em serviço. Este tipo de dano é um fenómeno de falha interlaminar que se caracteriza pelo descolamento de camadas adjacentes do laminado e ocorre principalmente nas camadas inferiores do material, à medida que a ferramenta se aproxima da superfície de saída. Assim, neste trabalho serão abordadas técnicas e metodologias para a diminuição da ocorrência do dano de delaminação que ocorre em materiais compósitos reforçados com fibra de carbono durante a furação de alta velocidade/alta produtividade. Os resultados obtidos utilizando este processo de fabrico têm-se vindo a revelar diferentes do que seria esperado, principalmente quando se aumentam as velocidades de rotação, considerando uma gama de diâmetros de furo que nos garantem o consequente aumento das velocidades de corte. Com efeito, a utilização de altas velocidades de rotação tem-se demonstrado eficaz na redução do dano de delaminação [7, 8] o que pode reflectir o facto de os mecanismos do processo de furação serem ligeiramente diferentes quando se utiliza furação de alta velocidade ao invés da furação convencional. O emprego de ensaios não destrutivos (END) é essencial para observar a extensão do dano obtido.

A principal motivação que conduziu à realização deste trabalho foi o facto de se ter verificado que o conhecimento dos mecanismos que regem o processo de furação, quando se trata de alta velocidade, ainda não estão completamente explicados. Por outro lado, as limitações encontradas na literatura consultada demonstram que há ainda muito a investigar para se identificar até que ponto se consegue reduzir o dano causado pela operação de furação. Desta forma, torna-se desafiante e motivadora a possibilidade de poder oferecer alguma contribuição para este conhecimento, através da via experimental.

## **1.2 Objectivos e trabalhos realizados**

O objectivo principal deste trabalho é a definição de metodologias e técnicas de modo a promover a diminuição do dano de delaminação durante o processo de furação a alta velocidade de placas em materiais compósitos reforçados com fibra de carbono através do estudo dos mecanismos do processo e de ocorrência da delaminação.

A utilização de furação de alta velocidade, com elevadas taxas de remoção de material e a conjugação de velocidades de corte e avanços elevados será estudada para se compreender a influência dos parâmetros de corte e da espessura do material a maquinar sobre o dano de delaminação que ocorre devido ao processo de furação. Segundo alguns investigadores [8, 9, 10] a utilização da furação de alta velocidade permite reduzir significativamente a ocorrência do defeito durante a furação. Assim, os parâmetros de corte utilizados neste estudo foram seleccionados de forma a cobrir um intervalo tão amplo quanto possível numa gama de valores sempre compreendida no que se considera o processo de alta velocidade.

Enquanto objectivo tecnológico, este trabalho visa sobretudo o desenvolvimento de um sistema de fixação das placas que permita guiar a broca através de um casquilho e o controlo da força de aperto das peças a furar. Foi já verificada a influência deste tipo de aperto [7] e observou-se que, para uma força determinada, se conseguiu reduzir o dano. No entanto, no estudo indicado, foi utilizado apenas um valor de força de aperto distribuída numa área correspondente à totalidade da peça. No trabalho aqui apresentado pretende-se investigar a gama de valores da força de aperto que permita minimizar a delaminação, quando distribuída numa área limitada em torno do furo.

Com o intuito de cumprir os objectivos traçados, foi realizada uma revisão da literatura sobre as áreas de interesse para sua compreensão e realização do planeamento do trabalho em causa. Após a realização dos ensaios de furação foi possível a visualização do defeito recorrendo a técnica de ensaios não destrutivos (END) por radiografia digital (raios-X) e posterior tratamento de imagem de modo a avaliar o dano, de forma qualitativa e quantitativa.



## **1.3 Estrutura da Tese**

Esta tese encontra-se dividida em cinco partes com os conteúdos abaixo indicado:

**Capítulo 1:** Neste capítulo contextualiza-se o tema e apresenta-se a motivação que conduziu a este trabalho. Procede-se ainda à definição dos objectivos e apresentação da estrutura deste documento.

**Capítulo 2:** É aqui apresentada a revisão do estado da arte que incide sobre as matérias relevantes do trabalho em questão:

Os materiais compósitos e suas aplicações

O processo de obtenção dos furos

O dano de delaminação

Os ensaios não destrutivos aplicáveis na quantificação do dano

**Capítulo 3:** Procedimento experimental onde se explica a realização da operação de furação dos provetes com o sistema de fixação desenvolvido, a visualização e quantificação do dano provocado para parâmetros de corte definidos.

**Capítulo 4:** Apresentação e discussão dos resultados relativo ao procedimento experimental.

**Capítulo 5:** Conclusões relativas ao trabalho experimental e sugestões de trabalhos futuros.

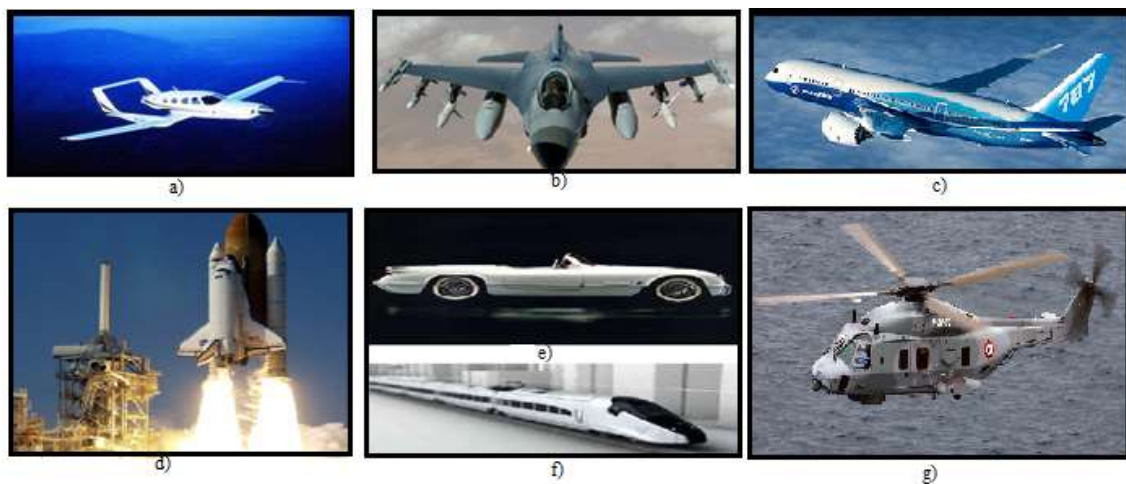


## 2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são materiais compostos por dois ou mais materiais, designados matriz e reforço, que quando ligados dão origem a um material com melhores propriedades em alguns aspectos do que cada um dos constituintes separadamente [1, 2, 12]. Os materiais compósitos ocupam actualmente um lugar de destaque entre os materiais de engenharia, desde artigos simples, utilizados quotidianamente por todos nós, até aplicações exigentes em estruturas e componentes para a indústria aeronáutica e aeroespacial [2]. A sua utilização tem vindo a crescer cada vez mais, devido às suas características. O baixo peso específico, a elevada resistência específica ( $e/\rho$ ) e resistência mecânica dos compósitos de matriz polimérica tem atraído vários tipos de indústrias [13]. Entre as diversas aplicações existentes deve-se realçar a utilização intensiva deste tipo de materiais nos novos aviões de transporte da Boeing (787) e da Airbus (A350) [1, 14, 15].

Além da indústria aeronáutica, estes materiais estão presentes em indústrias como: construção naval, transportes, indústria espacial e de defesa, equipamentos desportivos, entre outras [2, 8]. Alguns exemplos estão representados na figura abaixo.



**Figura 2.1-** Aplicações de materiais compósitos [2, 14, 15] (Adaptado)

Indústria Aeronáutica: a) M309, b) F16; c) Boeing 787, g) Helicóptero NH 90;  
Indústria espacial: d) Space Shuttle Atlantis; Indústria automóvel: e) Chevrolet Corvette de 1953;  
Transportes: f) Comboio de Alta velocidade

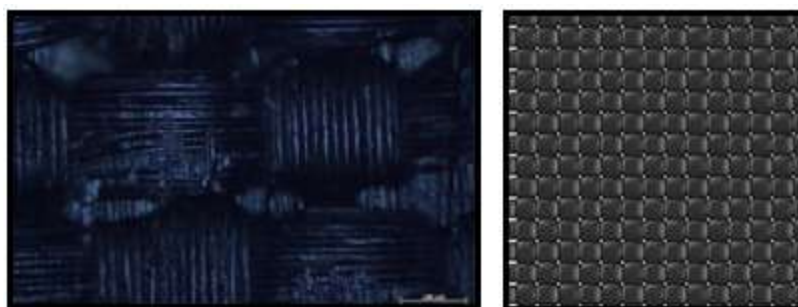
Os materiais compósitos do tipo fibroso destacam-se dos outros tipos de materiais compósitos pelo facto de a maioria dos materiais serem mais fortes e mais rígidos na forma de fibra do que de qualquer outra forma [13]. Resultam da mistura do material de reforço devidamente seleccionado com um outro material compatível (a matriz), de modo a obter determinadas características e propriedades [2]. A selecção do material da matriz e do tipo de fibra de reforço depende das características físicas e mecânicas requeridas pela aplicação [16]. A melhor combinação geral das propriedades dos compósitos é obtida pela utilização de laminados constituídos por camadas com diferentes orientações [2, 7].

A matriz tem como principal função unir as fibras de reforço, transferir e distribuir as cargas aplicadas [16, 17]. As forças de ligação entre a matriz e o reforço devem ser suficientemente fortes de modo a evitar a separação do laminado e evitar a ocorrência de espaços vazios [13, 16]. Pode-se distinguir compósitos de matriz polimérica e metálica como as mais utilizadas [2].

A baixa densidade dos polímeros fazem com que os compósitos de matriz polimérica sejam os mais importantes em termos de desempenho e de campos de aplicações. As fibras mais utilizadas em compósitos de matriz polimérica são as fibras de carbono, vidro, e aramida [2]. Para o trabalho em curso serão utilizadas placas em material compósito de matriz de resina epóxida reforçada com fibra de carbono.

Os materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono, normalmente designados por CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*), são de longe os materiais mais usados em muitas indústrias em virtude das suas elevadas propriedades mecânicas [2, 5].

Das várias formas de produção deste tipo de material, a mais utilizada na indústria aeronáutica implica a utilização de tecidos pré-impregnados. Estes tecidos podem ser feitos segundo diversos padrões e tramas diferentes. A mais simples é a bidireccional, também conhecida como *plain*, onde os feixes se cruzam em xadrez em ângulos de 0° e 90°. Para o trabalho aqui desenvolvido utilizou-se um tecido *plain weave* como se representa na figura 2.2.



**Figura 2.2-** Imagem detalhando a configuração *plain weave* [7]

## 2.2 Processo de Obtenção dos Furos

Existem vários processos de furação possíveis de se aplicar nos materiais compósitos [5]. A furação é um dos processos de maquinagem mais utilizado nomeadamente para o estabelecimento de ligações, ou reparações estruturais [2]. As operações de furação utilizando máquinas e ferramentas convencionais foram as primeiras a serem aplicadas nos materiais compósitos laminados [5, 17]. Actualmente existem várias técnicas avançadas de furação aplicáveis, como corte a laser, jacto de água, e electroerosão [5]. Pode-se afirmar que o recurso ao corte por jacto de água produz furos com qualidades superiores relativamente a furação com broca [2]. O processo de furação nos materiais compósitos é muito importante pois o desempenho das juntas aparafusadas e rebitadas depende da qualidade dos furos executados [2]. No entanto, o processo que prevalece na indústria continua a ser o processo de maquinagem de furação, não só devido ao aspecto económico, mas também pela maior disponibilidade de recursos. Neste trabalho vai-se tratar apenas de furação usando técnicas e ferramentas da indústria de materiais metálicos, devidamente adaptadas. Tais adaptações são efectuadas com vista à diminuição do dano na peça furada, e de modo a melhorar o desempenho dos componentes.

A furação é uma operação complexa que se caracteriza por mecanismos de corte [3, 18]. A natureza dos materiais compósitos (não homogéneos e anisotrópicos) levanta problemas específicos nesta operação [2, 3, 19], por isso precisam ser estudados. A furação nos materiais compósitos torna-se mais complexo pela existência de mecanismos que devem ser aclarados. Esta operação provoca danos nas peças que podem levar à sua posterior rejeição antes da entrada em serviço ou à diminuição da sua vida útil [5, 19].

O dano mais importante devido à operação de furação é a delaminação [2, 20, 21], que se localiza na orla do furo maquinado [10]. Este tipo de dano está directamente relacionado com o material, as ferramentas, e os parâmetros de maquinagem [17, 18, 23]. A redução deste tipo de dano é de primordial importância para indústrias relacionadas com a produção de peças em materiais compósitos [17].

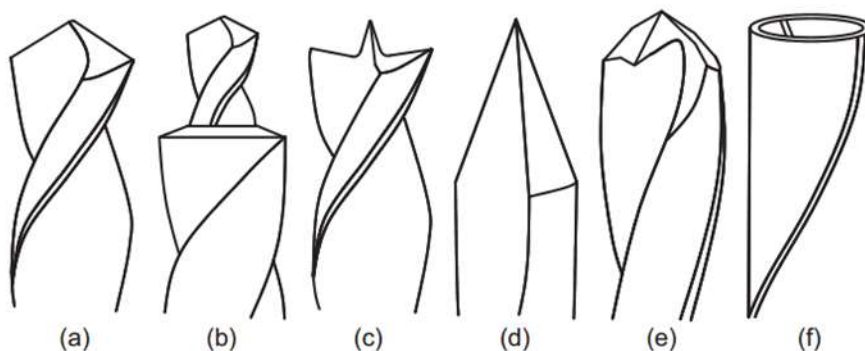
O principal mecanismo responsável pela ocorrência da delaminação é a força axial exercida pelo centro estacionário da broca [5, 6]. Esta força, segundo *Hocheng* e *Tsao*, está relacionada com as propriedades do material [6, 23, 24]. A minimização da força axial, a escolha adequada dos parâmetros de maquinagem e da geometria das ferramentas contribuem para a redução da delaminação [3, 17]. *Hocheng* e *Tsao* [6] elaboraram um modelo matemático demonstrando que a pré-furação diminui a ocorrência da delaminação.

Devido às características dos materiais compósitos desenvolveram-se novas ferramentas de corte e/ou adaptação das existentes de modo a reduzir danos mecânicos e térmicos garantindo assim um bom funcionamento dos mesmos.

A escolha do material e a geometria da ferramenta de corte são factores muito importantes, pois além de influenciarem a qualidade do furo [11, 25], quando se efectuam vários furos com a mesma ferramenta o desgaste da ferramenta gera um aumento na força axial que aumenta a probabilidade de ocorrência da delaminação [9, 12, 25-27]. Vários estudos foram efectuados com o objectivo de melhor escolher e/ou melhorar as ferramentas de corte que possam ajudar a diminuir ou mesmo eliminar a ocorrência de defeitos durante a maquinagem.

A furação de materiais compósitos requer ferramentas de materiais com elevada resistência ao desgaste e a abrasão. A resistência à abrasão deve-se à resistência dos reforços que são altamente abrasivos [7]. A ferramenta de corte mais utilizada na furação de laminados epóxicos é a broca helicoidal, e encontra-se em quase toda literatura consultada.

Através dos estudos efectuados acerca das ferramentas de corte, foi possível desenvolver ferramentas especificamente para maquinagem de materiais compósitos. Como a força axial depende fortemente da ferramenta de corte [25, 26], é muito importante a escolha do mesmo. A figura 2.5 demonstra ferramentas que foram desenvolvidas com o objectivo de melhorar a operação de furação nos materiais compósitos [3, 11]. Segundo *Liu* [5], estas ferramentas podem executar operações de furação com avanços mais elevados com menor ocorrência de danos quando comparadas com a geometria helicoidal. No entanto, foi já verificado o bom desempenho da geometria da broca helicoidal relativamente a ferramentas desenvolvidas especificamente para a furação de materiais compósitos e é possível obter valores baixos de delaminação utilizando valores elevados de velocidade de rotação e avanço com geometrias helicoidais [7].



**Figura 2.3-** Geometrias de ferramentas utilizadas na furação de materiais compósitos: (a) Helicoidal; (b) Escalonada; (c) Em W; (d) Espada; (e) Multifacetada; (f) “core drill” [3]

Na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono é muito importante a escolha e o controle dos parâmetros de maquinagem. De acordo com a literatura consultada os parâmetros

considerados mais importantes neste processo são a velocidade de corte ( $v$ ) e o avanço por dente ( $f_z$ ) [9, 10, 27]. Complementarmente, podem ser utilizadas como variáveis a velocidade de rotação ( $S$ ) e o avanço ( $f$ ), mas apenas quando se mantêm fixos parâmetros tais como o diâmetro da ferramenta e o número de gumes de corte da ferramenta. A escolha inadequada dos parâmetros de maquinagem pode danificar completamente o material [3] uma vez que a qualidade dos furos obtidos depende fortemente desses parâmetros.

A procura pela diminuição do tempo de produção e aumento da produtividade tem sido um dos maiores objectivos nas indústrias, assim a furação de alta velocidade surge como ferramenta fundamental na optimização dos esforços e aumento da competitividade.

Como já mencionado anteriormente a furação dos materiais compósitos é um processo de maquinagem muito importante [2, 5], por isso é relevante o estudo do efeito do aumento da velocidade e do avanço na furação. A furação de alta velocidade é uma das tecnologias mais promissoras para a redução da ocorrência da delaminação durante o processo de furação [5, 9].

O aumento da velocidade de rotação condiciona outras variáveis do processo de furação nomeadamente os restantes parâmetros de corte, as ferramentas de corte, o desgaste da ferramenta e a temperatura de corte que podem influenciar a ocorrência da delaminação e outros defeitos decorrentes da operação de maquinagem quando não controlados adequadamente. Será de frisar que na literatura consultada, quando se trata de investigação em furação de alta velocidade, o diâmetro da ferramenta é mantido constante. Assim, é possível estudar o efeito da velocidade de corte considerando como variável a velocidade de rotação. Na realidade, sabemos que diminuindo o diâmetro da ferramenta, para a mesma velocidade de corte, aumentamos a velocidade de rotação. Como neste trabalho também se mantém constante o diâmetro da ferramenta, toda a análise da revisão da literatura será realizada comparando valores de velocidade de rotação.

Vários estudos foram efectuados com o objectivo de obter resultados que possibilitem uma diminuição ou mesmo eliminação da ocorrência da delaminação por diminuição da força axial (*thrust force*) [4, 24]. No entanto, ainda não se verifica um total consenso acerca das metodologias que o permitam. A quase totalidade destes trabalhos foca-se no processo convencional de furação e existem ainda muito poucos estudos relativos à furação de alta velocidade. Nestes últimos [9-11, 26, 28], a principal preocupação prende-se com o desgaste da ferramenta e não com o dano devido à furação, que surge quantificado em apenas duas referências [10, 26]. Em seguida serão apresentados com maior detalhe estes estudos.

Lin e Chen [9] investigaram os efeitos do aumento da velocidade (velocidades de rotação,  $S$ , entre 9550 e 38650 rpm a que correspondem velocidades de corte,  $v$ , entre 210 e 850 m/min) sobre a força axial, o binário, o desgaste da ferramenta, e a qualidade dos furos obtidos durante a

furação de alta velocidade de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono. Usando duas brocas de carboneto sinterizado com diferentes geometrias, helicoidal e multifacetada, ambas com um diâmetro de 7 mm, concluíram que o aumento da velocidade de corte aumenta o desgaste das ferramentas, que proporciona um aumento da força axial, aumentando a possibilidade da ocorrência da delaminação. A força axial aumenta para ambas ferramentas, mas o binário aumenta ligeiramente quando se usa a broca multifacetada enquanto diminui para a helicoidal. Com valores de avanço,  $f$ , baixos de 0.03 a 0.07 mm/rev obteve-se uma boa qualidade dos furos. O desgaste das ferramentas de corte mostrou ser o maior problema encontrado na furação de alta velocidade de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono.

Do estudo feito por *Gaitonde et al.* [10] sobre o efeito dos parâmetros do processo (velocidade [3 820 a 38 197 rpm]; avanço [0.03 a 1.57 mm/rev]; ângulo de ponta [85, 115, 130°]) sobre o dano de delaminação na furação de alta velocidade em materiais compósitos de plástico reforçado com fibra de carbono concluiu-se que a furação de alta velocidade reduz significativamente a delaminação à entrada. A combinação de baixos valores de avanço por dente e ângulo de ponta são essenciais na diminuição da delaminação ocorrente na furação de compósitos CFRP. Foram utilizadas ferramentas de carboneto sinterizado (K20), de geometria helicoidal e diâmetro de 5 mm.

*Iliescu et al.* [11] avaliaram a força axial na furação de alta velocidade de materiais compósitos de resina epóxida reforçada com fibra de carbono e desenvolveram um modelo onde correlaciona a força axial, os parâmetros de corte e o desgaste da ferramenta. Utilizaram condições de alta velocidade, nomeadamente, velocidade de rotação de 12 000 rpm (velocidade de corte de 226.19 m/min) e avanço de 0.05 mm/rev, e ferramentas helicoidais de metal duro revestidas e não revestidas com diâmetro de 6 mm. Concluíram que a força axial aumenta com o aumento do desgaste da ferramenta de corte e que a velocidade de corte não tem muita influência sobre a força axial. De acordo com a experiência elaborada constataram que para obter um bom número de furos sem a ocorrência da delaminação os parâmetros do processo devem ser: velocidade de rotação 9 000 rpm, avanço 0.05 mm/rev e a ferramenta deve ser revestida de diamante.

*Krishnaraj et al.* [26] investigaram a furação de alta velocidade de CFRP em placas com espessura de 2 mm. Os parâmetros de maquinagem foram seleccionados dentro de gamas consideradas de alta velocidade (velocidade de rotação entre 12 000 e 20 000 rpm e avanço entre 0.01 e 0,3 mm/rev) com o objectivo de determinar a condição óptima de corte. O diâmetro da ferramenta foi de 5 mm com um ângulo de ponta de 118°. As conclusões obtidas foram que o avanço tem uma grande influência na força axial e na delaminação à saída. A velocidade de corte e o avanço não demonstraram influência na delaminação à entrada da broca e até aos

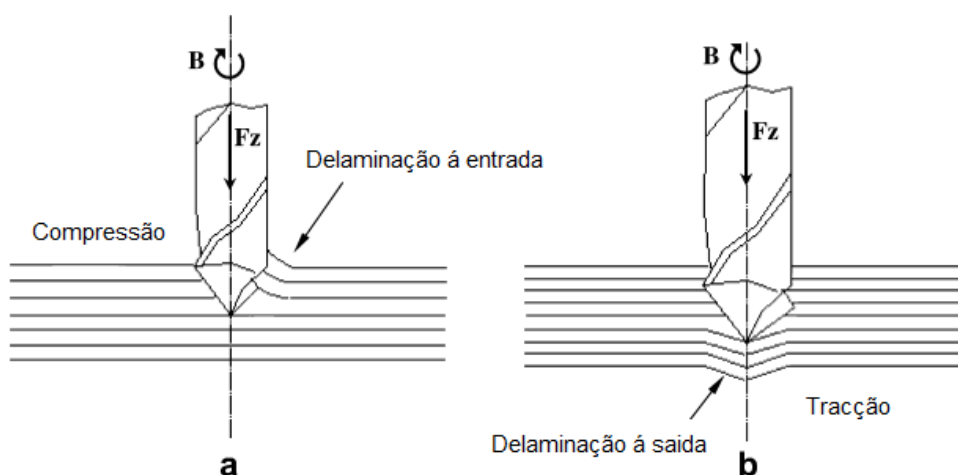


30 furos não foi observada delaminação considerada significativa. Os parâmetros óptimos de maquinagem foram definidos como:  $S = 12\,000$  rpm e  $f = 0.137$  mm/rev.

Em toda a literatura consultada relacionada com a furação convencional de materiais compósitos a conclusão obtida é a de que a utilização de baixos valores de avanço promove a redução de danos no material. Quando se trata de furação a alta velocidade, em geral, mantém-se a utilização de baixos valores de avanço conjugados com altas velocidades de rotação ( $\geq 8000$  rpm). No entanto, já se verificou que é possível a obtenção de pouco dano, mesmo com maiores valores de avanço [7, 28].

## 2.3 Delaminação Provocada pela Operação de Furação

Como se tem referido ao longo da dissertação, a delaminação é considerada o dano mais grave e importante que ocorre na furação de materiais compósitos reforçados com fibras. Ela desenvolve-se ao longo da direcção das fibras, quer à entrada quer à saída da broca [2, 29] como se mostra na figura 2.4. Este dano desenvolve-se quer nas camadas exteriores, quer nas camadas interiores da placa, o que torna difícil a sua detecção. A zona delaminada pode provocar uma diminuição das propriedades mecânicas dos componentes de uma estrutura que pode levar a falha de toda a estrutura [2]. A furação é normalmente o último processo a realizar antes da montagem dos componentes de uma estrutura e qualquer defeito pode conduzir à rejeição do componente.



**Figura 2.4-** Delaminação: a) à entrada (*peel-up*); b) à saída (*push-out*) [29] (Adaptado)

À entrada a broca promove o arrancamento das fibras das camadas superiores a partir do momento em que a extremidade da broca toca a primeira camada, forçando a quebra de ligações entre as camadas. À saída a broca actua como um punção e a força de avanço promove a delaminação entre as camadas inferiores [2].

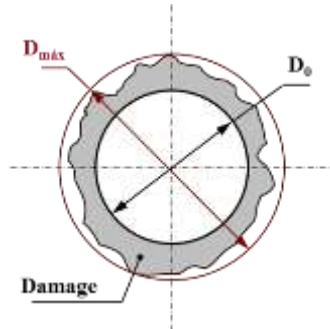
O estudo da ocorrência da delaminação é efectuado com recurso à teoria clássica das placas à flexão e mecânica da fractura [6, 29]. A partir do momento em que a força de corte ultrapassa a resistência interlaminar da placa há ocorrência da delaminação [5, 19]. Esta força é designada por força crítica para o início da delaminação. O primeiro modelo analítico para determinar a força crítica foi formulado por *Hocheng* e *Tsao* [6] e é dado pela equação 2.1 [6].

$$F_{crit} = \pi \left[ \frac{8G_{Ic}E_1h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde  $G_{Ic}$  é resistência à fractura interlaminar de modo I,  $E_1$  é o módulo de elasticidade,  $\nu$  é o coeficiente de *Poisson* da placa e  $h$  a profundidade da ferramenta que não entra em contacto com o material.

Existem vários métodos para avaliar o nível de delaminação em volta dos furos [5]. *Chen* propôs que a extensão da zona delaminada seja avaliada através do factor de delaminação que é dado pela equação 2.2 [30]:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad \text{Equação 2.2}$$



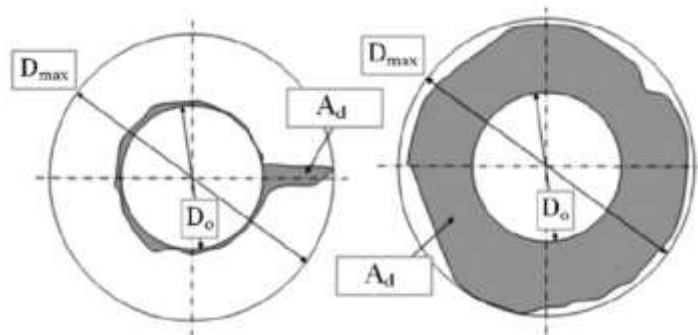
**Figura 2.5-** Caracterização do dano segundo *Chen*

Em que  $D_{max}$  é o diâmetro máximo delaminado e  $D_0$  é o diâmetro nominal do furo. *Chen* estudou a variação deste factor na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono unidireccional, e concluiu que havia uma relação aproximadamente linear entre a força axial durante o corte e o valor do factor de delaminação [30]. Esta fórmula apresenta limitações quando a área do círculo que enquadra o dano for muito maior que o dano.

Para dar resposta à limitação do critério apresentado por *Chen, Davim et al.* propuseram que a extensão da zona delaminada fosse avaliada através do factor de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ) que é dado pela equação 2.3 [29].

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad \text{Equação 2.3}$$

Nesta equação  $A_d$  corresponde à área do dano,  $A_{máx}$  à área correspondente ao  $D_{max}$ ,  $A_0$  à área nominal do furo e  $F_d$  é o factor de delaminação segundo o critério apresentado anteriormente.



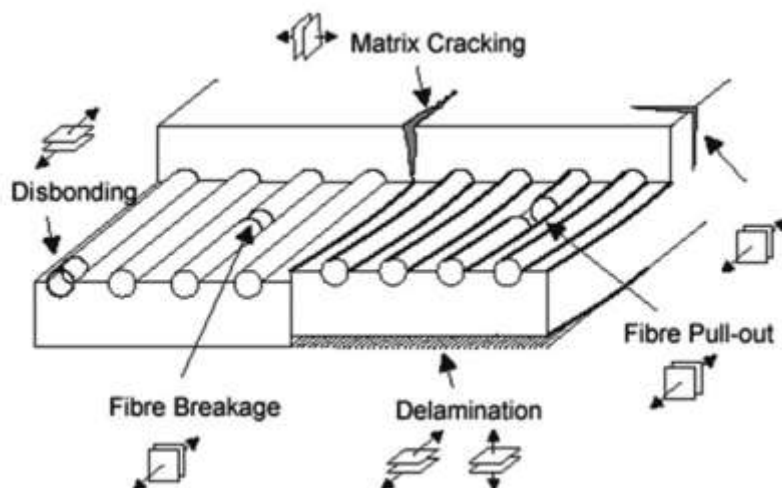
**Figura 2.6-** Caracterização do dano segundo *Davim* [29]

## 2.4 Ensaios não destrutivos

A aplicação dos ensaios não destrutivos (END) tem como objectivo a detecção de defeitos num material ou componente e no controlo da qualidade. A definição de END segundo a *American Society for Nondestructive Testing*: “os ensaios não destrutivos são métodos de ensaio utilizados para examinar um objecto, material, ou sistema sem prejudicar a sua utilidade futura” [31].

Todos os componentes de engenharia podem conter defeitos que podem ter origem na matéria-prima, na fabricação do componente, no processo de montagem, ou mesmo pela degradação do material durante a sua utilização em serviço [2]. A aplicação dos END depende do conhecimento do material a inspeccionar, das características do defeito e da acessibilidade e condições de inspecção.

As técnicas de END aplicáveis nos materiais compósitos são as mesmas aplicadas nos restantes tipos de materiais com algumas adaptações. Essas técnicas variam desde uma simples inspecção visual até às mais sofisticadas, por exemplo Tomografia Axial Computorizada (TAC). Existem várias técnicas possíveis de se aplicar nos materiais compósitos de matriz polimérica como se pode observar na tabela 2.1. A figura 2.7 mostra os diferentes tipos de defeito que podem ocorrer nos materiais compósitos.



**Figura 2.7-** Alguns defeitos típicos dos materiais compósitos [32]

**Tabela 2.1-** Comparação dos END aplicáveis nos compósitos poliméricos [33] (Adaptado)

Damage	De-ply	Fractography	Visual inspection	Ultrasonics (pulse-echo)	Radiography imaging
<i>Damage type:</i>					
Delaminations	Good	Very good	Good	Good	Fair
Fibre breakage	Fair	Good	Fair	Very poor	Good
Matrix cracks	Fair	Fair	Fair	Very poor	Good
Surface defects	Good	Good	Very good	Poor	None
<i>Damage size:</i>	Good	Good	Fair	Good	Good
<i>Damage location:</i>					
Distance from surface	Good	Very good	Fair	Good	Good

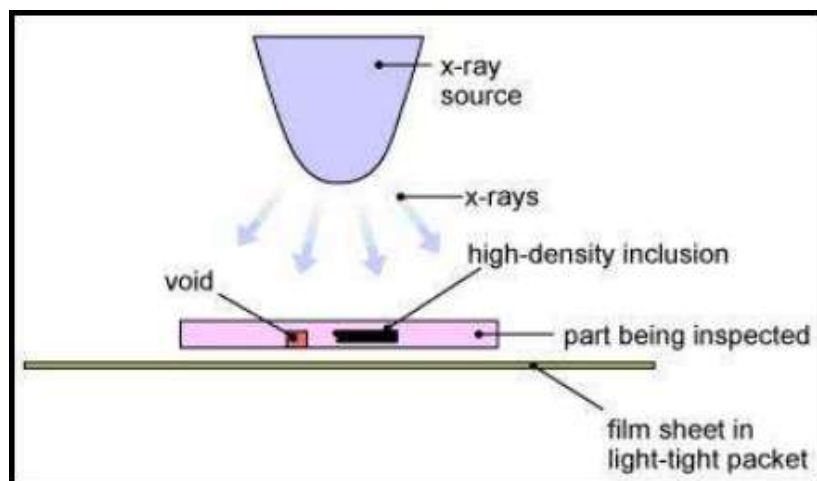
  

Damage	Thermal imaging	Acoustic emission	Laser-based optical imaging	Microwave	Eddy-current testing
<i>Damage type:</i>					
Delaminations	Fair	Poor	Fair	Very poor	Very poor
Fibre breakage	Poor	Poor	Poor	Poor	Good
Matrix cracks	Poor	Poor	Poor	Poor	Poor
Surface defects	Poor	Very poor	Poor	None	Poor
<i>Damage size:</i>	Fair	Very poor	Poor	Fair	Fair
<i>Damage location:</i>					
Distance from surface	Poor	Very poor	Very poor	Very poor	Poor

É de salientar que o dano de delaminação habitualmente apresentado na literatura neste tipo de comparação é o que ocorre no processo de produção das placas compósitas, ou seja, na ligação entre as camadas do material. A análise da delaminação que ocorre devido ao processo de furação tem vindo a ser desenvolvida, e os estudos mais recentes mostram que a caracterização deste tipo de dano é eficaz através da utilização quer de radiografia, quer de ultra-sons [2], sendo o

desempenho de ambos muito semelhante. Este tipo de delaminação, por ser um defeito que ocorre não só nas últimas camadas da peça (como já se referiu anteriormente) [3], é de difícil detecção nas camadas interiores com a técnica de inspecção visual [34, 35]. Os estudos em que a inspecção visual é a técnica utilizada focam-se apenas na delaminação na superfície da placa à entrada e/ou à saída do furo. Para a visualização e avaliação do dano de delaminação recorre-se a técnicas de ensaios não destrutivos antes, durante e depois da peça dar entrada em serviço. De acordo com a literatura consultada, e devido ao menor custo associado das técnicas de END aplicáveis nos materiais compósitos anteriormente indicadas, a mais apropriada e utilizada para a detecção da delaminação proveniente da furação é a radiografia (RX) [35, 36].

A análise radiográfica é uma das técnicas de END mais utilizadas na detecção de defeitos [32, 36]. O seu princípio de funcionamento é baseado na diferença de absorção da radiação penetrante pelo objecto inspeccionado. Essa diferença de absorção pode ser resultante de descontinuidades no material, (vazios ou mudanças de espessura) que provocam uma alteração da sua espessura. A radiação não absorvida é captada numa película fotossensível, o que permite a sua posterior revelação. Os defeitos irão aparecer no filme com uma tonalidade diferente das restantes partes do material, o que significa que há uma diferença na densidade do material e/ou espessura do material. A radiografia é uma das técnica de END muito eficiente para detectar falhas internas nos materiais e componentes, e pouco eficiente para detectar falhas superficiais. A figura abaixo demonstra o princípio básico de funcionamento da inspecção por radiografia convencional.



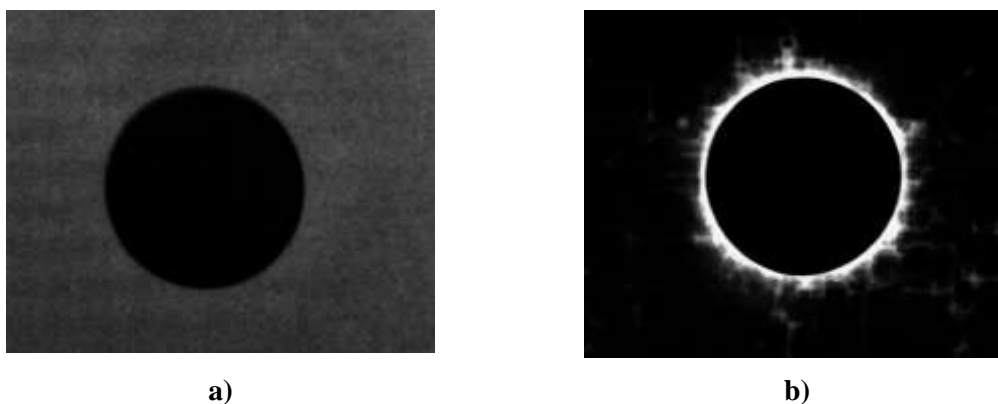
**Figura 2.8-** Esquema de funcionamento da radiografia convencional [36]

A utilização do filme para a detecção de imagem obriga a posterior processamento e não permite a imediata visualização do defeito. Desta forma, a evolução para os sistemas digitais foi muito importante uma vez que a visualização do defeito é imediata [33, 36].

A aplicação da análise radiográfica em materiais compósitos difere em alguns aspectos da aplicação em outros materiais. Esta diferença é devido aos materiais compósitos serem altamente transparentes aos raios-X, [33, 36] por isso é preciso usar baixas energias de radiação (tipicamente nas gamas 10-50 kV, e em alguns casos 10-20 kV).

Alguns defeitos como o caso da delaminação [33, 36] tornam-se invisíveis com a utilização da radiografia pelo facto de este tipo de defeito não alterar a composição nem quantidade de material que o raio-X atravessa, por isso torna-se importante o uso de líquido contrastante com características radiopacas como o dibromometano e diiodometano [32]. Estes ocupam as zonas do defeito do material permitindo uma melhor absorção da energia radiante e possibilitando assim a visualização do defeito [36].

Nesta tese utilizou-se a técnica de radiografia digital com o uso de diiodometano como líquido contrastante para a detecção da zona delaminada no material e posterior cálculo do factor de delaminação. De modo a garantir uma boa visualização do defeito alguns parâmetros devem ser tomados em conta como o tempo de exposição do material no líquido contrastante, a distância da fonte de radiação ao objecto, e o tempo de exposição à radiação. A figura 2.9 mostra um exemplo de radiografia digital sem e com a utilização de líquido contrastante.



**Figura 2.9-** Radiografia digital dos danos devidos à furação em CFRP  
a) sem líquido contrastante; b) Com líquido contrastante

## 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o procedimento experimental realizado para a presente dissertação, que será dividido em quatro partes.

A primeira parte irá consistir na descrição dos equipamentos utilizados na furação das placas e aquisição de dados experimentais. Seguidamente faz-se a caracterização dos provetes utilizados na furação, com base nos dados fornecidos pelo fabricante do material juntamente com o material. Posteriormente apresentam-se as ferramentas e os respectivos parâmetros de corte. A última parte deste capítulo corresponde à descrição do procedimento para aquisição da imagem do dano e quantificação do mesmo com o uso das técnicas e metodologias de ensaios não destrutivos de radiografia digital (raios-X) e de tratamento de imagens.

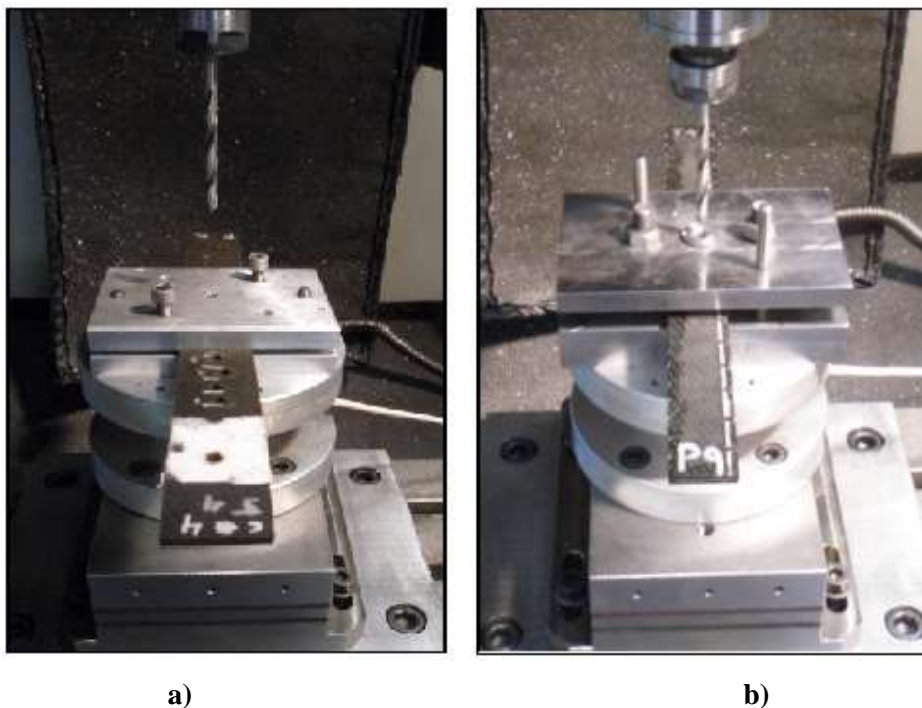
### 3.2 Equipamentos Utilizados na furação das Placas

O trabalho experimental consistiu num conjunto de ensaios da furação de alta velocidade e foram realizados no centro de maquinaria vertical LEADWELL VMC-15 disponível no laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT-UNL e apresentado na figura 3.1. Para a concretização da gama de valores de velocidades de rotação pretendidas para alta velocidade foi adaptada uma cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153 que permite um máximo de rotação de 20 000 rpm. A utilização do equipamento CNC (*Computer Numerical Control*) permite uma maior versatilidade na selecção dos parâmetros.



**Figura 3.1-** Centro de maquinaria CNC

Neste trabalho os ensaios de furação foram realizados utilizando dois sistemas de fixação diferentes. O primeiro, denominado de “0 kN”, consiste na fixação simples do provete, sem ser sujeito a força de aperto (Figura 3.2 a)). Neste caso, o provete manteve-se fixo apenas de forma a garantir a correcta realização da operação de furação. Os restantes ensaios foram realizados num sistema com características diferentes de forma a assegurar o controlo do aperto no provete (entre 1 e 8 kN) através de uma chave dinamométrica (Figura 3.2 b)). A utilização destes dois sistemas de fixação com geometrias diferentes tem como objectivo investigar a influência da força de aperto sobre o dano resultante da operação de furação.



**Figura 3.2-** Sistemas de fixação utilizados na furação das placas:  
a) Ensaios sem aperto (0 kN); b) Ensaios com aperto de 1 a 8 kN

O sistema de fixação desenvolvido para este trabalho tem na sua constituição:

Duas placas em aço C45 com uma secção de 25×90 mm;

Dois pinos de guia;

Dois parafusos Allen (sextavada interior) M8;

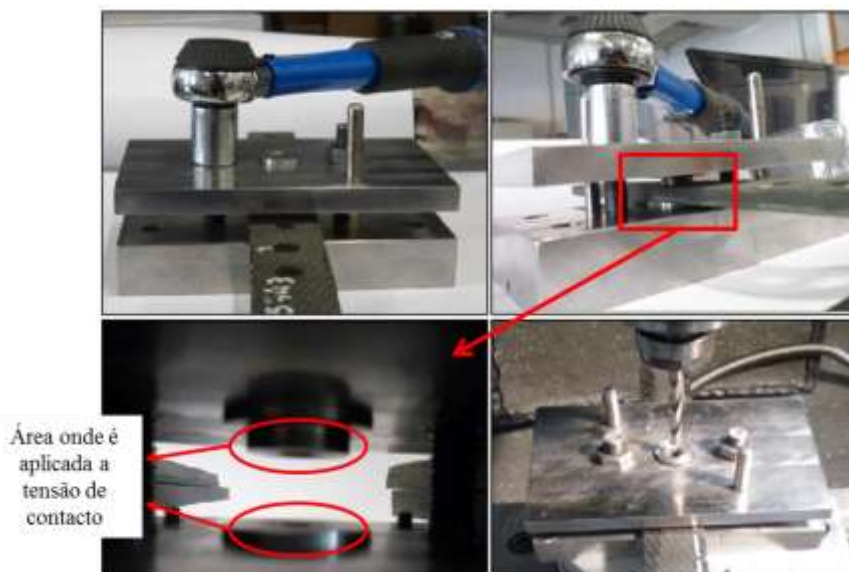
Dois casquilhos em aço C45.

A placa inferior está fixa ao equipamento. A placa superior encontra-se ligada à inferior através de uma ligação aparafusada e guiada pelos pinos de guia. As duas placas contêm um furo central de 16 mm onde estão colocados os casquilhos, cuja função é garantir a tensão de contacto uniforme na área circundante ao furo de acordo com o aperto aplicado. Comparando com o



mecanismo do corte de precisão, no qual este sistema se baseia, estes casquilhos funcionam como anéis de retenção, ou seja, possuem um furo central com o mesmo diâmetro da ferramenta a utilizar para servir de “máscara” durante o processo. A folga entre a ferramenta e o furo do casquilho é mantida tão pequena quanto possível, tal como no corte fino, para favorecer a precisão dimensional. Pretende-se assim impor uma deformação localizada, de forma a evitar o arrancamento das fibras na periferia do furo provocado pela entrada e saída da broca no material.

A figura 3.3 ilustra o sistema de fixação das placas.



**Figura 3.3-** Sistema de fixação das placas

Para este trabalho foram desenvolvidos, além do sistema de fixação aqui apresentado, dois tipos de sensores para possibilitar o controlo da força de aperto exercida sobre o provete. Estes sensores não foram utilizados porque se verificou que as configurações adoptadas no que diz respeito à sua construção não eram as adequadas, não sendo possível realizar as medições. Desta forma foi construído e utilizado o mecanismo acima representado. Os sensores mencionados podem ser visualizados no anexo (Anexo A).

O aperto foi introduzido através de uma chave dinamométrica. A conversão da força em momento de aperto que é introduzido na chave encontra-se na tabela 3.1. As fórmulas de cálculo podem ser visualizadas em anexo (Anexo B).

**Tabela 3.1-** Dados do momento introduzido na chave dinamométrica e tensão exercida nos provetes

Força de Aperto (kN)	Momento (Nm)	Tensão de Contacto na entrada (N/m <sup>2</sup> )	Tensão de Contacto na Saída (N/m <sup>2</sup> )
1	2.81	5.51	2.77
2	5.62	11.02	5.55
4	11.24	22.05	11.09
6	16.87	33.07	16.64
8	22.49	44.09	22.19

A monitorização e aquisição de dados relativa à força axial foram realizadas através de um dinamómetro *Kistler 9257B*, que se encontra ligado a um amplificador de carga multicanal *Kistler 5070*. A conversão do sinal analógico em digital foi feita num sistema de aquisição de dados (DAQ). O sinal foi processado e os dados correspondentes aos valores medidos foram apresentados através do *software LabVIEW*.



**Figura 3.4 -** Sistema de aquisição de dados

### 3.3 Materiais Utilizado

As placas reforçadas com fibra de carbono utilizadas no procedimento experimental, fornecidas pela OGMA – Indústria Aeronáutica Portuguesa, foram fabricadas pelo processo de autoclave e obtidas a partir de 10 camadas de um pré-impregnado com espessura de 0.2 mm, que após o empilhamento deram origem a placas com uma espessura final de 2 mm. Tendo a necessidade de obter provetes de teste com diferentes espessuras foram coladas pelo mesmo processo. Para a concretização dos ensaios utilizaram-se provetes com três espessuras diferentes (2, 4 e 6 mm) de modo a ser possível estudar ainda a influência da espessura do material na

quantificação do dano para os diferentes apertos aplicados. As placas utilizadas para o procedimento são placas cortadas em provetes de 250×25 mm. O material utilizado, que faz parte da fuselagem do helicóptero NH90, Provem do mesmo lote dos materiais utilizados na fabricação das peças. Na figura 3.5 apresentam-se os provetes de diferentes espessuras usadas na componente experimental deste trabalho.



**Figura 3.5** - Diferentes espessuras dos provetes utilizados

A tabela 3.2 apresenta os dados facultados pelo fabricante relativos às propriedades físicas do laminado.

**Tabela 3.2-** Propriedades físicas do laminado

Teor máximo de vazios [%]	<b>2</b>
Teor de fibras por volume [% v/v]	<b>50 ± 3</b>
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>1.46 – 1.51</b>
Espessura da camada [mm]	<b>0.20– 0.24</b>

### 3.4 Ferramenta e parâmetros de corte

Sendo a escolha da ferramenta de corte um dos factores muito importante na ocorrência do dano de delaminação na furação dos materiais compósitos, para este trabalho foi utilizada uma broca helicoidal com 5 mm de diâmetro e ângulo de ponta de 120° em metal duro (K20), tendo assim a resistência à abrasão e ao desgaste que são as qualidades requeridas para furar compósitos de fibra de carbono. Este é dos tipos de ferramenta mais comum a nível industrial.



**Figura 3.6-** Broca helicoidal usada na componente experimental

No que diz respeito aos parâmetros de corte, estes foram seleccionados de acordo com os resultados obtidos em estudos já efectuados [7, 11, 26, 28] que demonstraram que a utilização de avanços e velocidades de rotação na gama de valores seleccionados contribuem para a redução do dano.

Os parâmetros de corte, o diâmetro da ferramenta e a espessura das placas usadas na componente experimental encontram-se sintetizadas na tabela abaixo.

**Tabela 3.3-** Dados dos ensaios experimentais

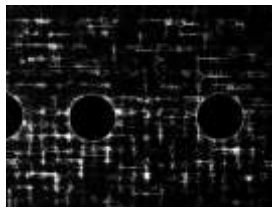
Velocidade de rotação $S$ [rpm]	Velocidade de corte $v$ [m/min]	Avanço por dente $f_z$ [mm/dente]	Avanço $f$ [mm/rev]	Diâmetro da ferramenta [mm]	Espessura dos provetes [mm]
<b>12 000</b>	188.5	<b>0.055</b>	0.11	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>16 000</b>	251.3	<b>0.0775</b>	0.155	<b>5</b>	<b>4</b>
<b>20 000</b>	314.2	<b>0.11</b>	0.22	<b>5</b>	<b>6</b>

A combinação dos parâmetros de corte com o diâmetro da ferramenta, espessura dos provetes e apertos aplicados (de 0 a 8 kN), produziram um total de 162 ensaios. Durante a realização dos ensaios de furação fez-se sempre o controlo e monitorização da força axial para verificação da sua real relevância na ocorrência do dano de delaminação.

### 3.5 Aquisição e tratamento de imagem

A visualização do dano de delaminação nas peças furadas foi efectuada usando técnicas de ensaios não destrutivos, nomeadamente inspecção visual e radiografia digital. Para análise da extensão do dano recorreu-se a tratamento de imagem de modo a obter o valor do factor de delaminação.

Os provetes foram previamente imersos num líquido contrastante de diiodometano, durante um período de tempo dependente da espessura das placas. Nas placas menos espessas o efeito de capilaridade foi visível, conforme ilustrado na figura 3.7 e o tempo de imersão teve de ser reduzido para cerca de 5 minutos. Nas restantes espessuras o tempo médio de imersão foi de cerca de 20 minutos.



**Figura 3.7-** Provete imerso durante um período de tempo demasiado elevado

Seguidamente foram radiografadas perpendicularmente à fonte de radiação usando o sistema de raio-X Kodak 2100 com uma energia máxima de 70 Kv, 300 KHz e corrente de 7mA, associado a um sistema digital de aquisição de imagem Kodak RVG 5100. Uma caixa de chumbo serve como dispositivo de blindagem. A figura 3.8 mostra o equipamento utilizado na aquisição das imagens.



**Figura 3.8-** Equipamento de análise radiográfica

Foram feitos vários ensaios com vários tempos de exposição e diferentes distâncias focais e concluiu-se que as condições ideais para este caso seriam um tempo de exposição de 0.160 s e distância focal de 45 a 50 mm, o que é aceitável para o dispositivo usado sem riscos de ocorrência de zonas de penumbra. Este equipamento encontra-se disponível no laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI.

Como resultado do processo obtiveram-se as imagens que serviram para a posterior medição da zona delaminada. Estas foram guardadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) de alta resolução (1200×1600 *pixels*) e seguidamente processadas de modo a caracterizar as regiões de interesse. O processamento de imagem teve como objectivo obter quantitativamente a medição dos diâmetros e áreas considerados relevantes para a quantificação do dano de delaminação. Estes valores foram conseguidos usando um algoritmo desenvolvido por Silva [37] com as ferramentas de imagem do *Matlab* e adaptado para este trabalho.

O tratamento de imagem para a obtenção do factor de delaminação foi efectuado com base no seguinte procedimento:

- 1) Selecção, na imagem obtida por radiografia, da zona que contém o furo, usando um *software* de tratamento de imagem (neste trabalho usou-se o *ImageJ*);
- 2) Selecção da zona de interesse, que é a selecção da área danificada;
- 3) Segmentação da imagem onde se procedeu à divisão da imagem digital em conjuntos de *pixels* facilitando a sua análise;
- 4) Compilação dos dados para o cálculo do factor de delaminação.

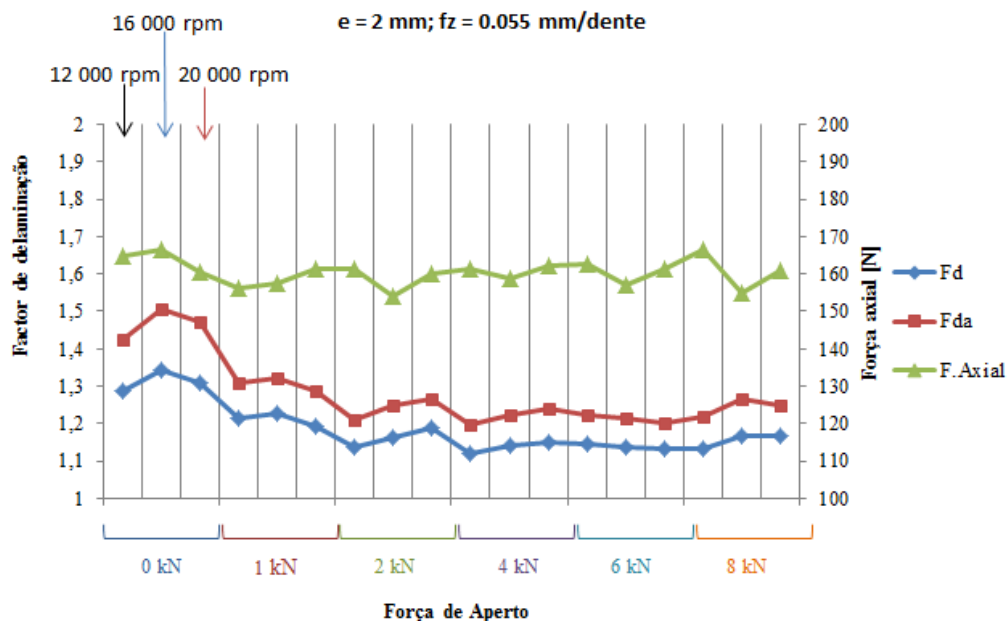
Após a aplicação do tratamento de imagem obtiveram-se no *dataset* do *Matlab* os valores dos termos necessários ao cálculo do factor de delaminação proposto por *Chen* e do factor de delaminação ajustada proposto por *Davim* e que são apresentados no capítulo a seguir.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na componente experimental realizada para a presente dissertação serão apresentados e discutidos neste capítulo. A influência do aperto sobre o dano e a força axial para as diferentes espessuras dos provetes, será analisada. Será igualmente estudada a influência dos parâmetros de corte, nomeadamente do avanço por dente e da velocidade de rotação.

Relativamente ao planeamento do trabalho experimental, foi realizado um conjunto de ensaios para cada espessura dos provetes, no qual se consideraram três valores de avanço por dente. Para cada avanço introduzido fez-se variar a velocidade de rotação e o aperto.

Na figura 4.1 apresentam-se os resultados obtidos em cada ensaio para o factor de delaminação ( $F_d$ ), o factor de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ) e a força axial ( $F_{Axial}$ ) em função da força de aperto. Os resultados obtidos para cada aperto correspondem a cada uma das velocidades de rotação consideradas (assinaladas na figura).

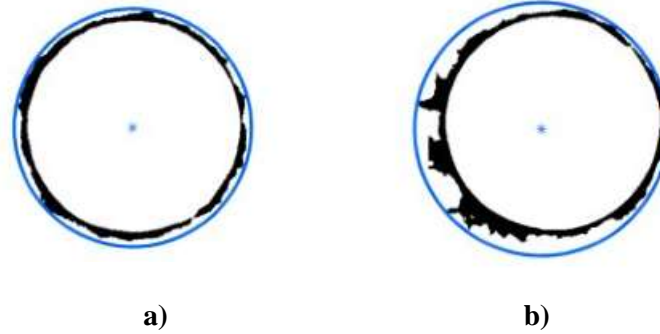


**Figura 4.1-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ )

Na figura acima representada pode-se observar que o comportamento do factor de delaminação e do factor de delaminação ajustado são idênticos, como seria de esperar. Desta forma e para efeitos de discussão de resultados irão utilizar-se apenas os resultados do factor de delaminação,  $F_d$ . A figura demonstra existir uma tendência na diminuição do dano com o aumento do aperto. Os resultados do factor de delaminação obtidos sem aperto (0 kN) correspondem à gama

de valores mais altos obtidos nestes ensaios, e os valores mais baixos e com menor variação ocorrem para o aperto de 4 a 6 kN.

Na figura 4.2 representam-se as imagens do menor e maior dano verificados no provete de 2 mm de espessura. A circunferência que aparece nas imagens corresponde ao diâmetro máximo da zona delaminada, valor utilizado para o cálculo dos factores de delaminação.



**Figura 4.2-** Representação do dano ( $e = 2$  mm;  $f_z = 0.055$  mm/dente):  
a) Aperto de 4 kN e  $S = 12\ 000$  rpm; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 12\ 000$  rpm

Os valores de força axial, que segundo a literatura é considerada o maior responsável pela ocorrência da delaminação, foram adquiridos no procedimento experimental. Os resultados mostram que não houve variação significativa destes valores. Aparentemente, a velocidade de rotação também não apresenta influência considerável sobre a força axial, o que está de acordo com as observações de *Iliescu et al* [11].

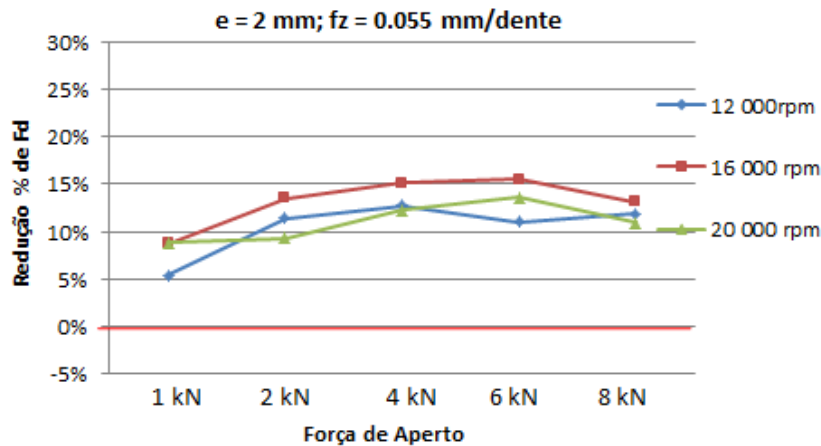
No que diz respeito ao factor de delaminação foi estudada a influência do aumento da velocidade de rotação ( $e$ , consequentemente, da velocidade de corte) para cada um dos apertos considerados. Uma vez que se pretende estudar a influência do aperto, considerou-se o valor da redução percentual do factor de delaminação. Este valor foi calculado tendo como padrão o caso em que não existiu aperto, da seguinte forma:

$$\% \text{ redução} = \left( \frac{F_{d0} - F_{di}}{F_{d0}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 4.1}$$

onde  $F_{di}$  é o valor do factor de delaminação para cada um dos apertos ( $i = 1:8$ ) e  $F_{d0}$  é o valor do factor de delaminação para 0 kN.

Na figura 4.3 compara-se a redução percentual do factor de delaminação para cada velocidade de rotação, considerando os apertos de 1 a 8 kN.

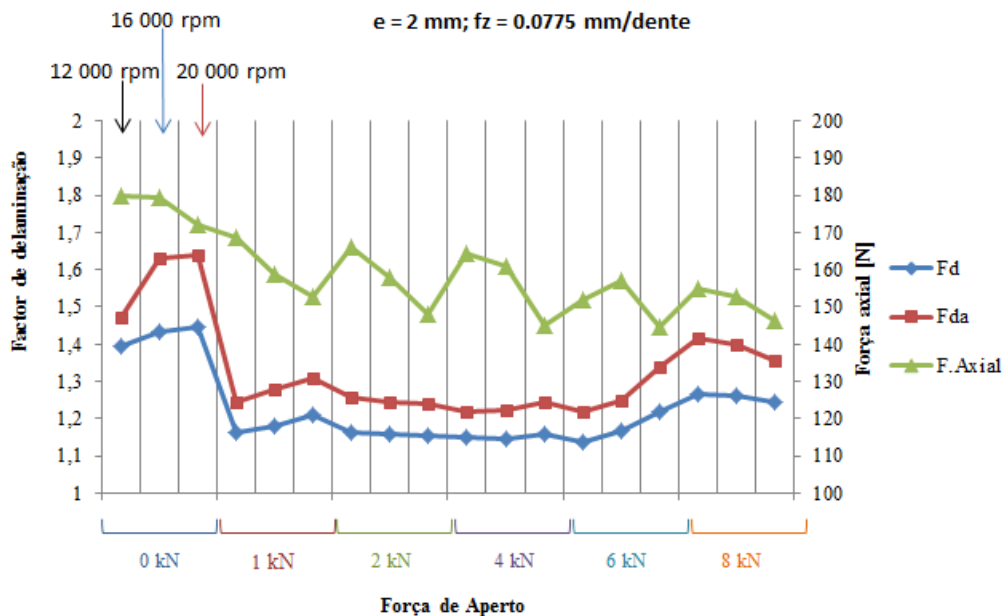




**Figura 4.3-** Redução percentual do dano para as diferentes velocidades com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ )

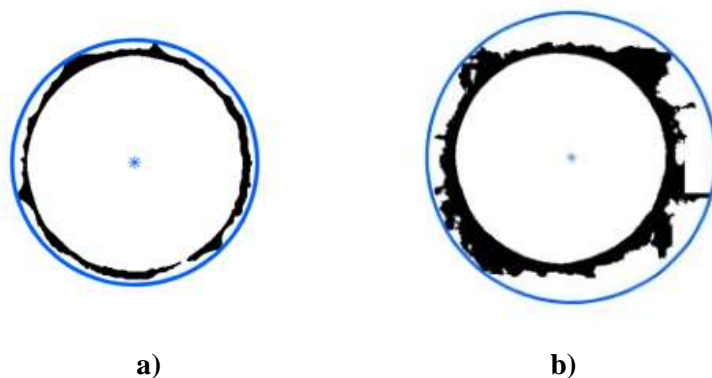
Observando o gráfico da figura 4.3 pode verificar-se que o dano tende a diminuir com o aumento do aperto até 6 kN, aumenta ligeiramente com o aperto de 8 kN. A velocidade de rotação não parece apresentar uma influência significativa na redução do dano, uma vez que a variação nunca ultrapassa 10%. Contudo, a velocidade que apresentou a maior percentagem de redução do dano, mesmo pouco significativo, quando comparado com restantes é a de 16 000 rpm.

Considerando o conjunto de ensaios relativos ao avanço por dente  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ , os resultados obtidos para a variação de ambos os factores de delaminação e força axial em função do aperto são apresentados na figura 4.4.



**Figura 4.4-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

Como no caso anterior, o comportamento de ambos os factores de delaminação é idêntico. Verifica-se uma redução significativa do dano com o aumento do aperto até 4 kN onde ocorrem os valores mais baixos da delaminação. Os valores mais altos correspondem à situação sem aperto (0 kN) e ao aperto de 8 kN. A figura 4.5 representa imagens do dano dos melhores e piores resultados obtidos nos ensaios para este caso.

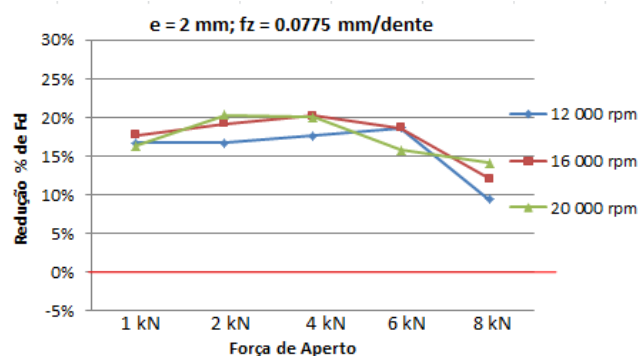


**Figura 4.5-** Representação do dano ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ):  
a) Aperto de 4 kN e  $S = 16\,000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 12\,000 \text{ rpm}$

Pode observar-se que o dano obtido com o aperto de 4 kN, quando comparado com o obtido sem aperto, apresenta uma forma mais regular, o que pode indicar que o aperto influencia também a forma do dano.

Neste caso, a força axial tende a diminuir com o aumento da velocidade de rotação, embora essa diminuição não aparente ser significativa. Este comportamento é idêntico para os diferentes apertos, com excepção do ensaio realizado com aperto de 6 kN e  $S = 12\,000 \text{ rpm}$ . Este facto pode ser devido a factores que não foram identificados mas que perturbaram o ensaio.

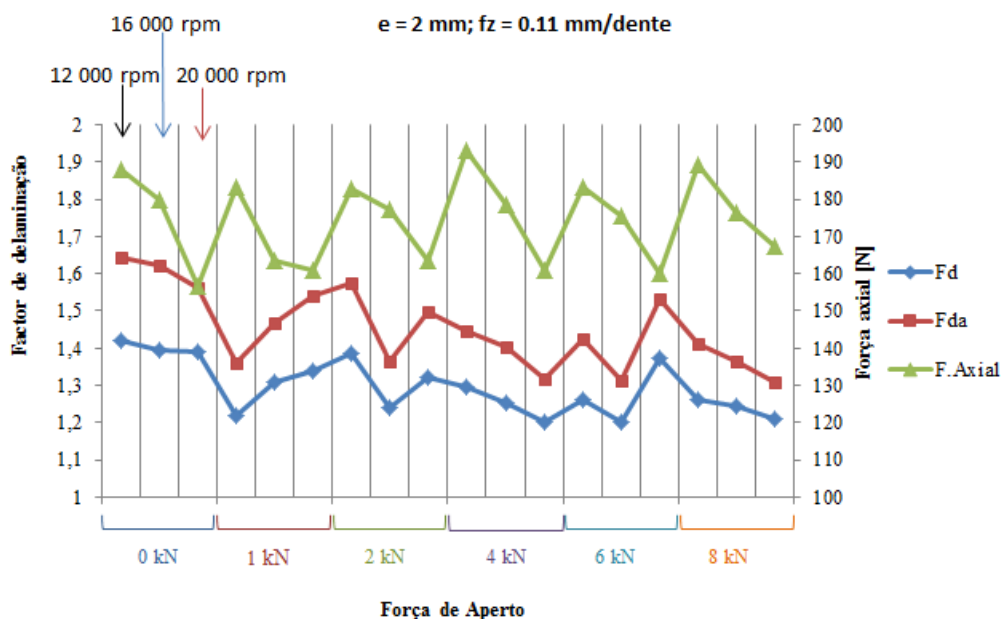
Na figura 4.6 compara-se a redução percentual do factor de delaminação para cada velocidade de rotação, considerando os apertos de 1 a 8 kN, agora para o avanço por dente  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ .



**Figura 4.6 -** Redução percentual do dano para as diferentes velocidades com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

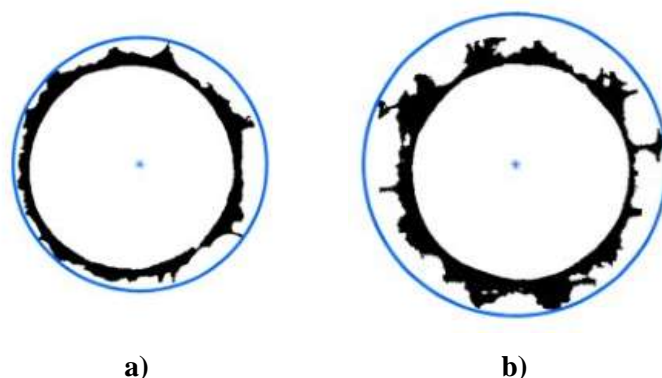
Pelo gráfico representado na figura 4.6 pode-se verificar que o aumento do aperto proporcionou um aumento da percentagem de redução do dano até 4 kN. O aperto de 8 kN foi o que apresentou a menor percentagem de redução do dano para qualquer velocidade. É de notar que o aumento da velocidade de rotação não apresentou grande influência na redução do dano.

A figura 4.7 mostra o comportamento dos factores de delaminação e força axial em função do aperto com a variação da velocidade de rotação em cada aperto como exemplificado para o aperto de 1 kN. Este caso corresponde à utilização do avanço por dente de 0.11 mm/dente.



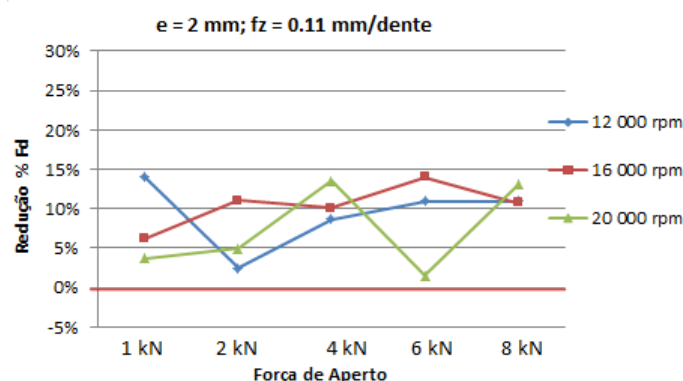
**Figura 4.7-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )

Embora não se observem grandes variações do dano com o aumento do aperto, uma vez mais os ensaios realizados sem aperto são os que apresentam os valores mais altos do dano. O comportamento da força axial e do factor de delaminação com o aumento da velocidade de rotação é idêntico na situação sem aperto e quando se usam apertos de 4 e 8 kN e tende a diminuir. A força axial diminui com o aumento da velocidade de rotação para todos os apertos. Na figura 4.8 encontram-se as imagens que exibem o melhor e o pior resultado obtido para este caso.



**Figura 4.8-** Representação do dano ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ):  
a) Aperto de 4 kN e  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$

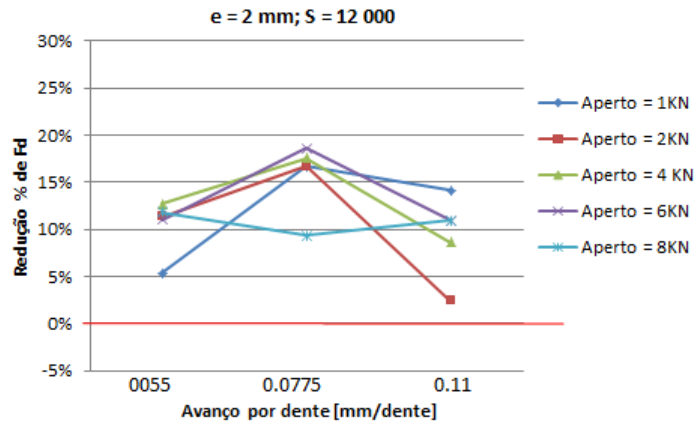
A figura abaixo apresenta a redução percentual do dano obtido com os apertos de 1 a 8 kN para as diferentes velocidades de rotação.



**Figura 4.9-** Redução percentual do dano para as diferentes velocidades com a força de aperto ( $e = 2 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )

Observando o gráfico da figura 4.9 pode-se verificar que, com as velocidades de rotação de 12 000 e 16 000 rpm, há uma redução do dano com o aumento do aperto, com excepção do aperto de 1 kN e velocidade 12 000 rpm, que aparenta ser um ponto singular. É de notar que a influência da velocidade para a redução do dano para este caso não evidencia ser significativa. Dos resultados obtidos com a velocidade de 20 000 rpm pode verificar-se que as forças de aperto de 4 e 8 kN representam as situações mais favoráveis para reduzir a delaminação, para o avanço considerado.

Com o objectivo de melhor se perceber a influência do aumento do avanço sobre o factor de delaminação estudaram-se os resultados obtidos para cada velocidade de rotação com a variação do avanço. A figura 4.10 mostra a redução percentual do dano obtido com os apertos de 1 a 8 kN com a variação do avanço para a velocidade de rotação de 12 000 rpm.

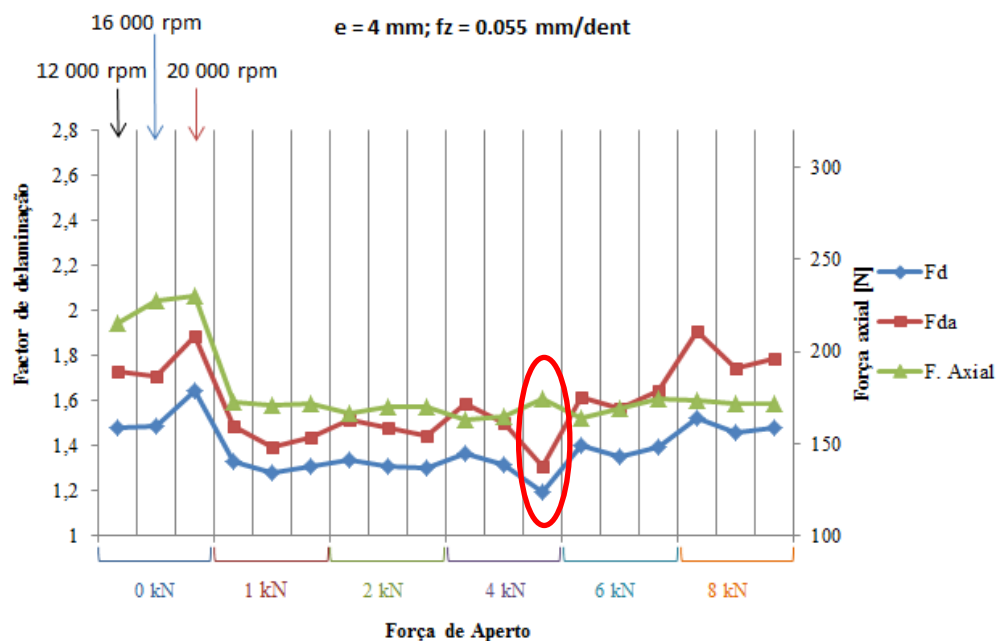


**Figura 4.10** – Redução percentual do factor de delaminação com o avanço por dente ( $S = 12\,000$  rpm;  $e = 2$  mm)

Do gráfico apresentado na figura 4.10 pode-se verificar que com excepção do aperto de 8 kN, onde o dano pouco varia com a variação do avanço por dente, a maior redução do dano, quando se utilizam espessuras de 2 mm, ocorre com a utilização de  $f_z = 0.0775$  mm/dente. Nota-se também que os valores da redução do dano com este avanço por dente, para os vários apertos, são muito próximos. O comportamento do dano com a variação do avanço utilizando as velocidades de rotação de 16 000 e 20 000 rpm são idênticos ao da figura acima representada (figura 4.10) e podem ser visualizados em anexo (Anexo D).

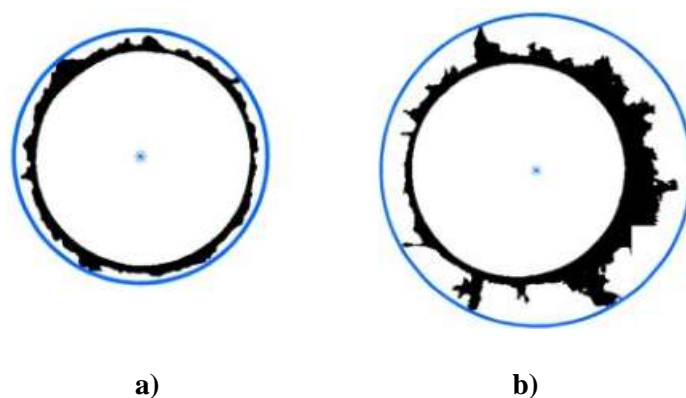
Seguidamente serão apresentados os resultados referentes aos provetes de 4 mm de espessura. A análise será realizada de forma análoga aos anteriormente apresentados.

A figura 4.11 mostra os resultados da variação dos factores de delaminação e força axial em função do aperto para um avanço por dente de 0.055 mm/dente. Cada um dos três pontos representados em cada força de aperto corresponde a uma diferente velocidade de rotação, como indicado na figura.



**Figura 4.11** - Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto  
( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ m/dente}$ )

Da figura 4.11 acima representada pode-se observar que o comportamento do factor de delaminação e do factor de delaminação ajustado é similar, como esperado, e já observado para a espessura de 2 mm. O dano diminui com o aumento da força de aperto até 4 kN, invertendo a tendência a partir de 6 kN. Os ensaios correspondentes à situação sem aperto e à força de aperto de 8 kN, apresentam os valores do factor de delaminação mais elevados. A figura 4.12 ilustra a imagem do dano, onde se demonstra um exemplo do melhor e pior caso registados, respectivamente para a força de aperto de 4 kN e para os ensaios sem aperto.

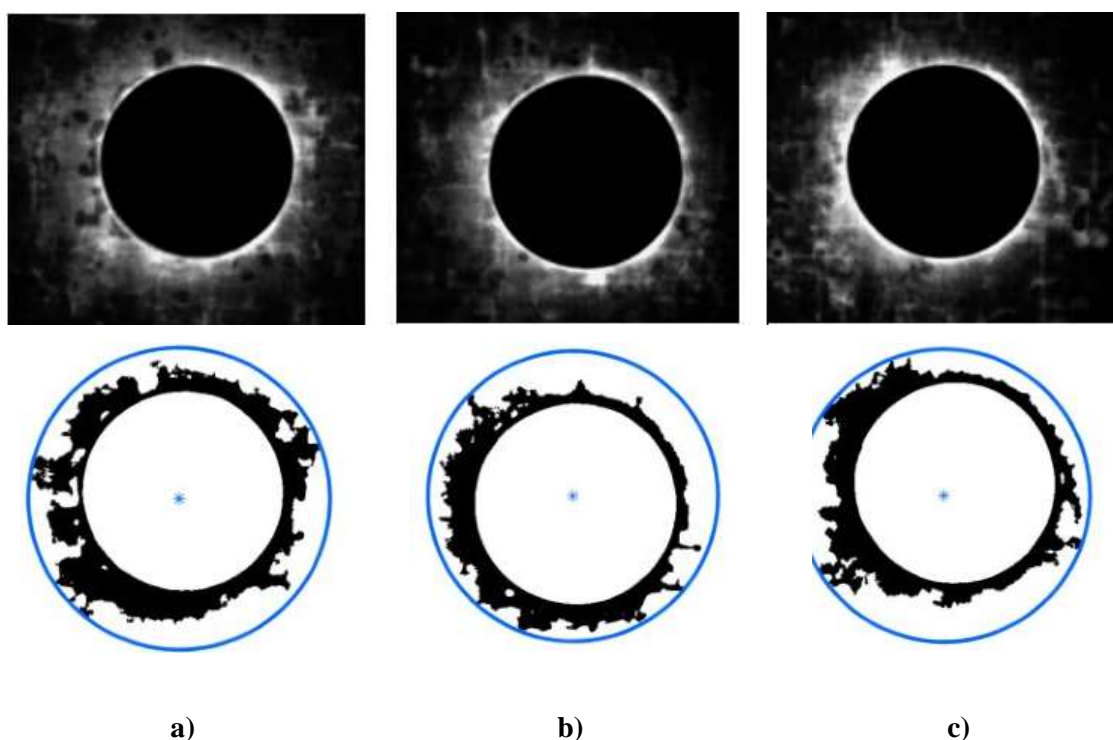


**Figura 4.12**- Representação do dano ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ ):  
a) Aperto de 4 kN e  $S = 20\,000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 12\,000 \text{ rpm}$

Ao proceder à comparação do comportamento do dano e da força axial pode verificar-se que quer quando não se utiliza aperto, quer quando a peça a furar é sujeita a força de aperto, não se consegue estabelecer relação. Observam-se inclusivamente situações nas quais a diminuição do

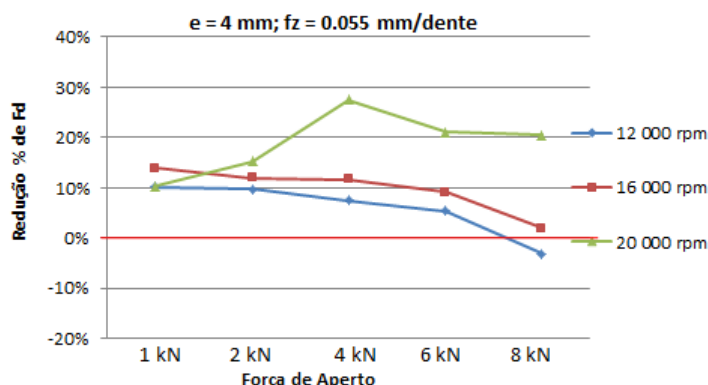
factor de delaminação ocorre quando a força axial é mais elevada (por exemplo, o ensaio assinalado na figura, com força de aperto de 4 kN e  $S = 20\,000$  rpm).

Ao utilizar as forças de aperto de 6 e 8 kN observou-se um aumento do factor de delaminação mas não da força axial, que se manteve relativamente constante. Possivelmente, este aumento do dano pode dever-se ao facto de a força de aperto ter sido excessiva. A utilização dos casquilhos tem como função exercer tensão de contacto no material para minimizar o efeito da delaminação à entrada e saída da broca. Sendo esta tensão de contacto muito elevada, pode provocar deformações indesejáveis no material. Com efeito, foi verificado o esmagamento das camadas exteriores na zona de contacto com os casquilhos. As imagens apresentadas na figura 4.13 ilustram os resultados obtidos por radiografia digital onde foi possível a visualização e medição do dano provocado pelo esmagamento.



**Figura 4.13-** Imagem do dano provocado pelo esmagamento nos ensaios que utilizaram força de aperto de 8 kN ( $e = 4$  mm;  $f_z = 0.055$  mm/dente)  
a)  $S = 12\,000$  rpm; b)  $S = 16\,000$  rpm; c)  $S = 20\,000$  rpm

Em seguida são apresentados os resultados da redução percentual do factor de delaminação em função da força de aperto para cada velocidade de rotação.

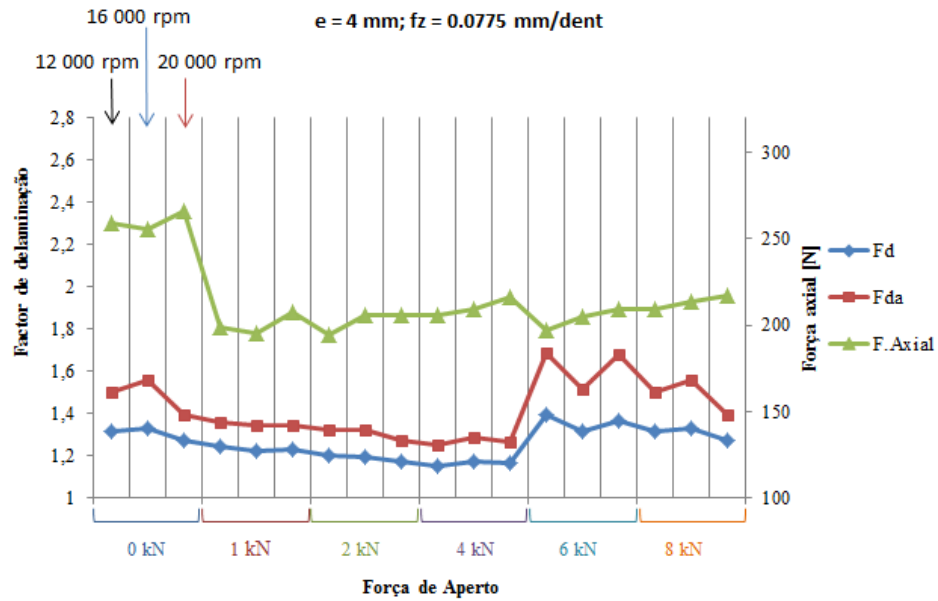


**Figura 4.14-** Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ )

Da observação da figura 4.14 pode-se verificar que, com excepção dos ensaios realizados com força de aperto de 1 kN, a maior percentagem de redução do dano ocorre com a utilização da velocidade de rotação de 20 000 rpm. Os resultados obtidos da redução do dano com as velocidades de 12 000 e 16 000 rpm são muito próximos e apresentam comportamentos idênticos. Assim, a velocidade de rotação de 20 000 rpm é aquela em que mais se verifica a influência da força de aperto sobre a redução do dano, o que pode ser um bom indicador de que a técnica desenvolvida neste trabalho é útil quando se produzem furos com elevada produtividade. Será também de destacar que a situação onde se utilizou força de aperto de 8 kN e menor velocidade de rotação ( $S = 12 \text{ 000 rpm}$ ) produziu factor de delaminação superior ao dos ensaios sem aperto, o que foi expectável devido ao esmagamento verificado.

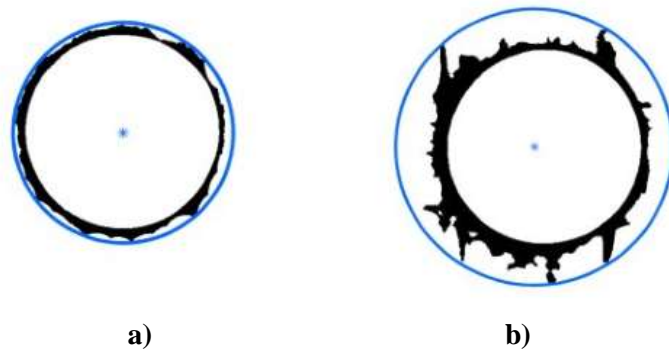
Considerando o conjunto de ensaios relativos ao avanço por dente  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ , os resultados obtidos para a variação de ambos os factores de delaminação e força axial em função do aperto são apresentados na figura 4.15. Observa-se novamente a similaridade do comportamento dos factores de delaminação convencional e ajustado e estes tendem a diminuir com o aumento da força de aperto até 4 kN, aumentando a partir de 6 kN. Os resultados do factor de delaminação obtidos com os apertos de 0, 6 e 8 kN correspondem aos valores mais altos obtidos nos ensaios. Os valores da força axial resultantes da situação sem aperto são maiores do que os obtidos com aperto. Neste caso (situação com aperto), não houve variação relevante dos valores da força axial.





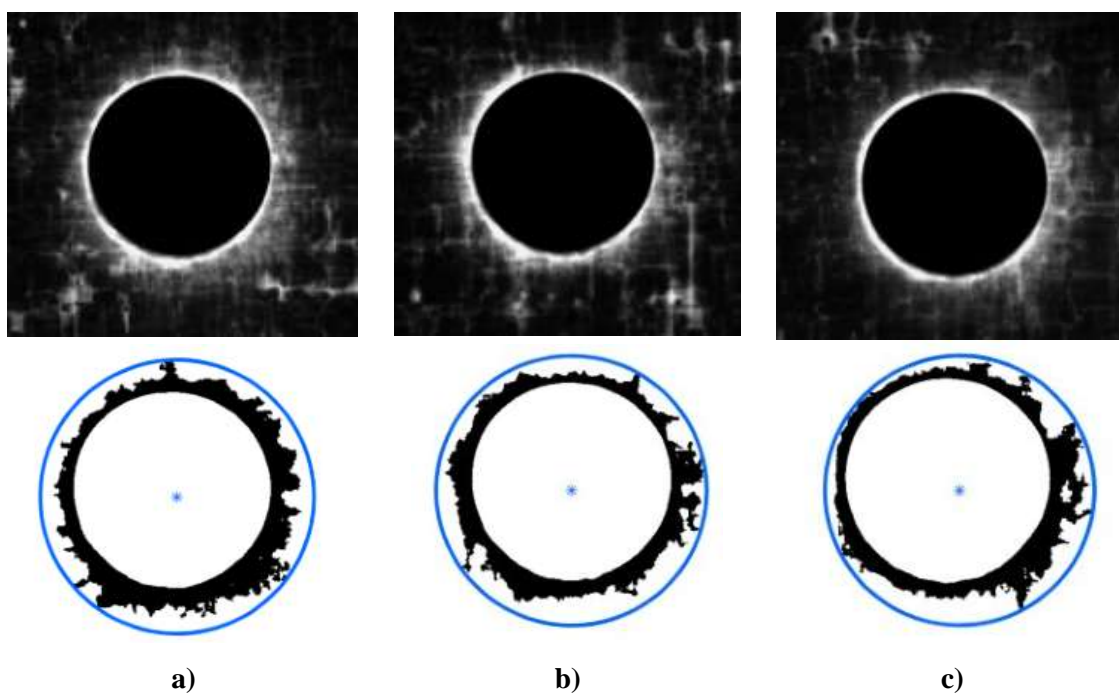
**Figura 4.15-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

A imagem do dano é ilustrada na figura 4.16. O melhor e pior caso foram observados respectivamente para a força de aperto de 4 kN e para os ensaios sem aperto. É de notar que a forma do dano obtida com a força de aperto de 4 kN é mais regular do que a do dano gerado sem aperto, o que pode antever que o aperto influencia também a forma do dano.



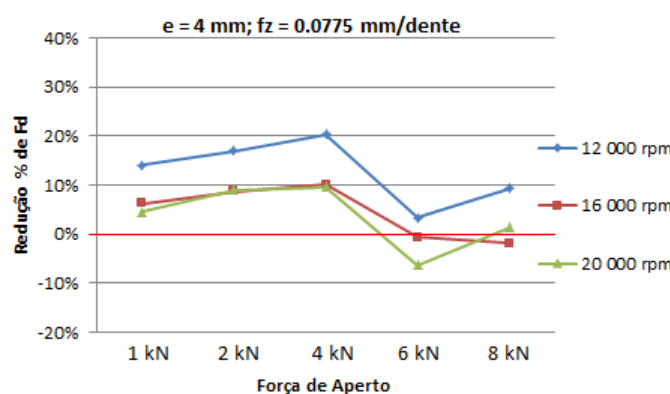
**Figura 4.16-** Representação do dano ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ ):  
a) Aperto de 4 kN e  $S = 12\,000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 12\,000 \text{ rpm}$

Para as forças de aperto de 6 e 8 kN notou-se um aumento do valor do factor de delaminação devido ao efeito de esmagamento provocado nos provetes, como ilustrado na figura 4.17.



**Figura 4.17-** Imagem radiográfica e respectiva binarização ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )  
a) Aperto de 6 kN e  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; b) Aperto de 6 kN e  $S = 20\ 000 \text{ rpm}$ ; c) Aperto de 8 kN e  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$

A figura 4.18 apresenta os resultados da redução percentual do dano em função da força de aperto para cada velocidade de rotação.

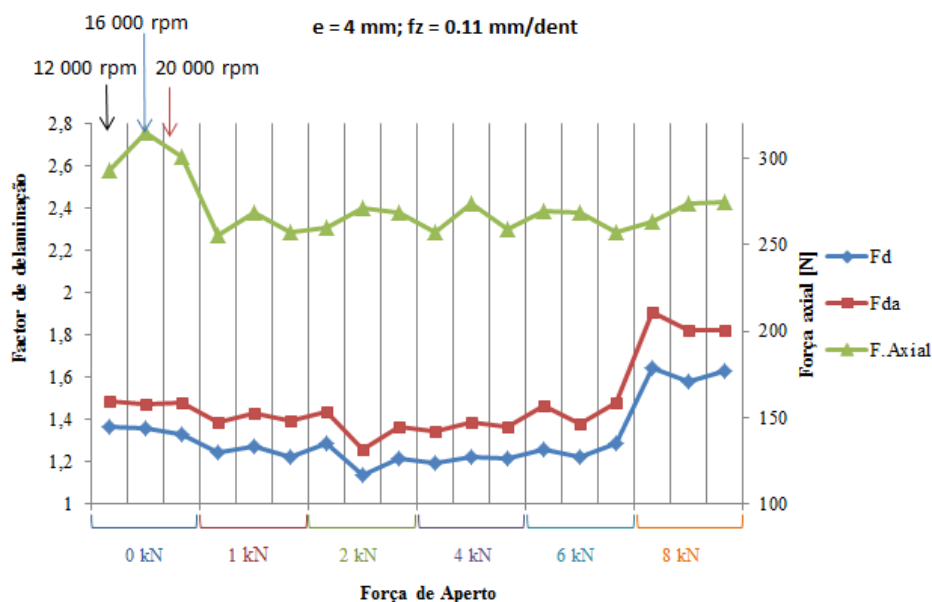


**Figura 4.18-** Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

Na figura 4.18 pode-se verificar que para todos os ensaios com força de aperto a maior percentagem de redução do dano ocorre com a velocidade de rotação de 12 000 rpm. Nota-se também que o comportamento da redução do dano é idêntico para as três velocidades consideradas. Nos ensaios realizados com força de aperto de 6 e 8 kN obtiveram-se alguns resultados cujo factor de delaminação foi semelhante ou mesmo superior aos realizados, com os mesmos parâmetros, sem

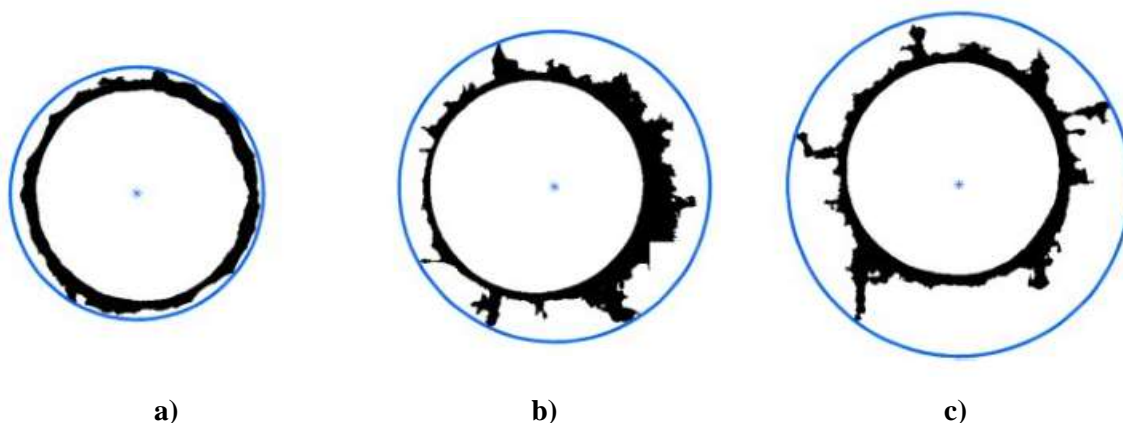
aperto. Esta observação pode ser indiciadora destes valores de força de aperto não serem adequados.

A figura 4.19 apresenta a variação dos factores de delaminação e força axial em função da força de aperto para um avanço por dente de 0.11 mm/dente.



**Figura 4.19-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}; f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )

Assim como nos resultados apresentados anteriormente para os restantes valores de avanço por dente, o comportamento dos factores de delaminação é idêntico. Os valores do dano obtido com as forças de aperto até 6 kN apresentam pouca variação embora haja alguma tendência de diminuição com o aumento da força de aperto. Refira-se que houve um grande acréscimo do dano com a utilização da força de aperto de 8 kN, analogamente aos resultados discutidos anteriormente para provetes com a mesma espessura. A figura 4.20 ilustra as imagens do dano obtido nos ensaios com força de aperto de 0, 4 e 8 kN. Uma vez mais, a imagem do dano obtida no ensaio com força de aperto de 4 kN é mais regular do que as referentes aos ensaios realizados sem força de aperto e com força de aperto de 8 kN.

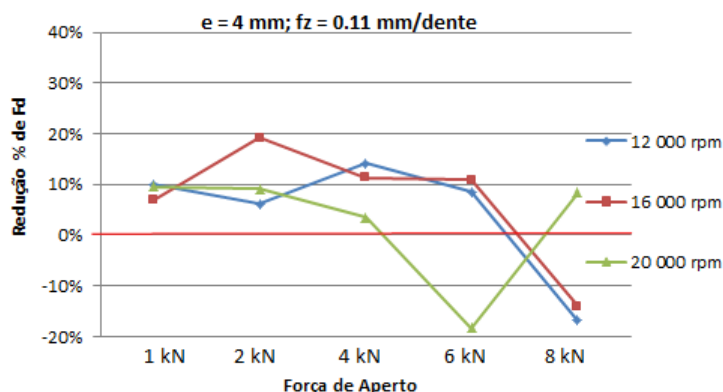


**Figura 4.20-** Representação do dano ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ ):

a) Aperto de 4 kN e  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 20\ 000 \text{ rpm}$ ; c) Aperto de 8 kN e  $S = 20\ 000 \text{ rpm}$

O comportamento da força axial seguiu a mesma tendência que o factor de delaminação e foi semelhante em todas as situações em que houve aperto. Os valores mais altos deste parâmetro foram registados para os ensaios sem aperto.

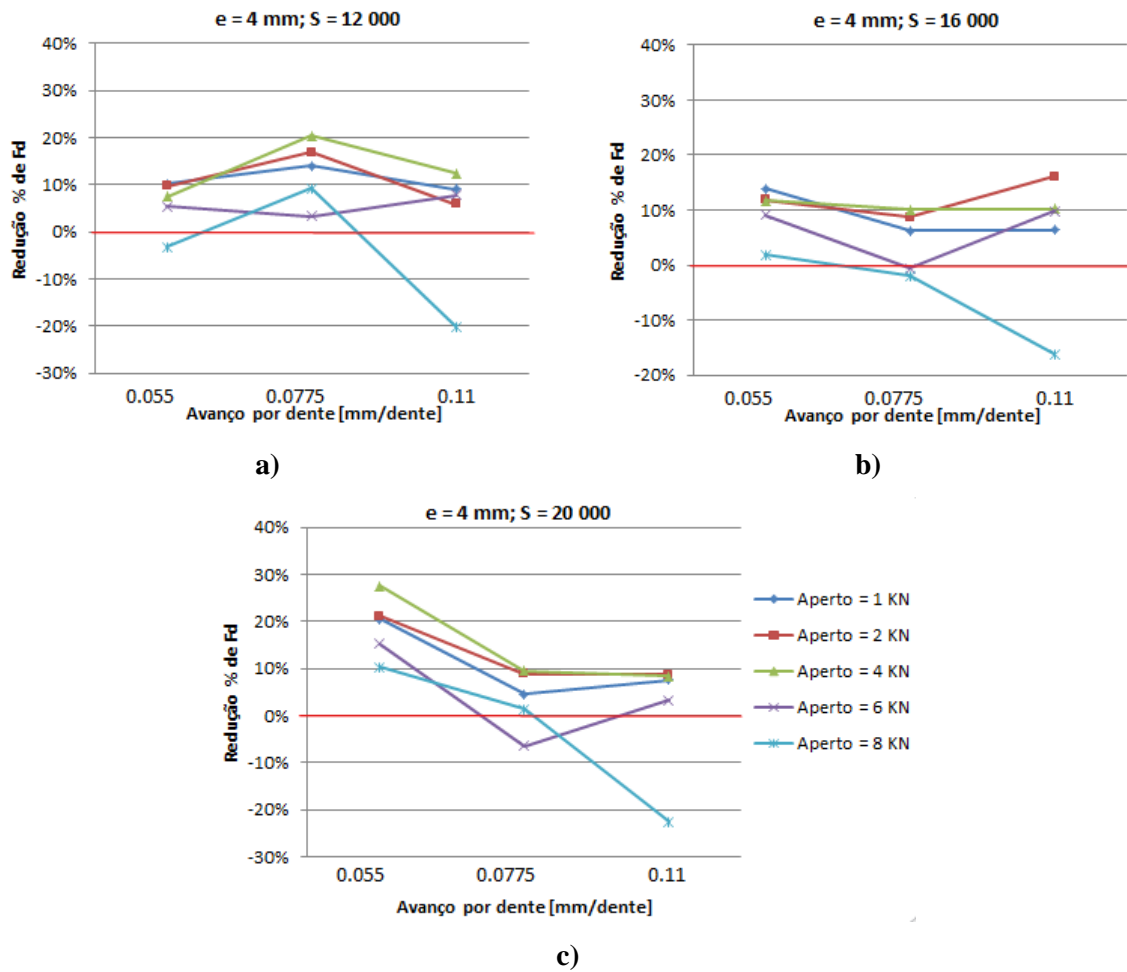
A figura 4.21 mostra os resultados relativos à redução percentual do dano em função da força de aperto para cada velocidade de rotação.



**Figura 4.21-** Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 4 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )

A partir do gráfico acima apresentado pode-se observar não existirem diferenças significativas dos valores da redução do factor de delaminação para as velocidades de rotação de 12 000 e 16 000 rpm. Uma vez mais houve casos em que o factor de delaminação foi superior ao obtido sem aplicação de força sobre o provete, que correspondem à força de aperto de 6 e 8 kN.

Com o objectivo de melhor se perceber a influência do aumento do avanço na ocorrência do dano, apresenta-se a figura 4.22 que mostra a redução percentual do dano obtido com a variação do avanço para as diferentes velocidades de rotação.



**Figura 4.22-** Redução percentual do factor de delaminação com o avanço por dente ( $e = 4$  mm)  
a)  $S = 12\ 000$  rpm; b)  $S = 16\ 000$  rpm; c)  $S = 20\ 000$  rpm

No gráfico apresentado na figura 4.22 a) pode-se verificar que nos ensaios realizados com velocidade de rotação de 12 000 rpm a maior percentagem de redução do dano ocorre com o avanço por dente de 0.0775 mm/dente, com excepção do ensaio com força de aperto de 6 kN, e os resultados obtidos com os apertos de 1, 2, 4 e 8 kN apresentam comportamento idêntico com a variação do avanço.

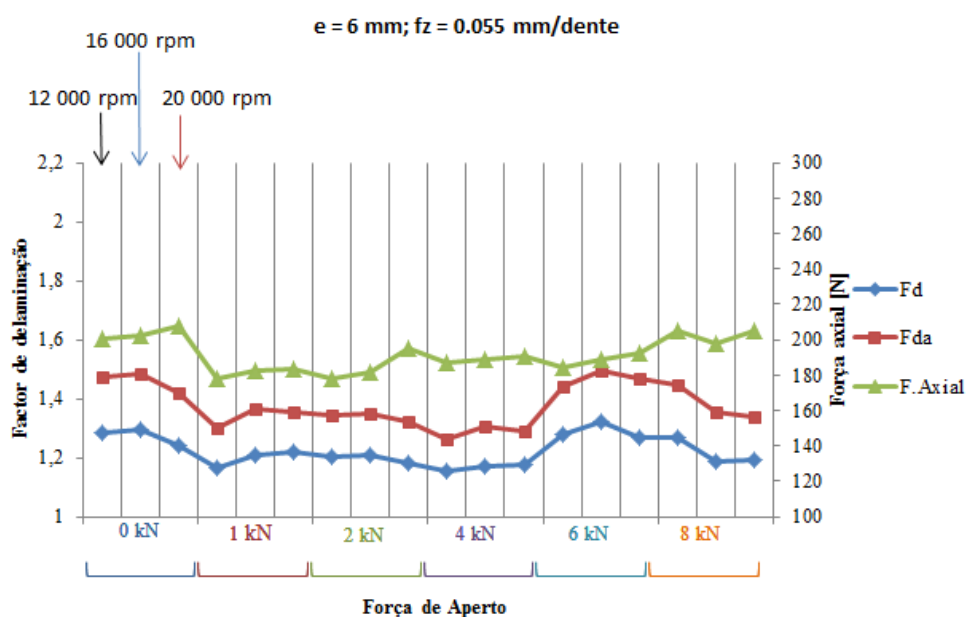
Com a velocidade de rotação de 16.000 rpm (figura 4.22 b)) os resultados obtidos com avanço por dente de 0.055 e 0.11mm/dente são muito próximos. Nota-se também que, com a velocidade de 16 000 rpm, a variação do avanço não é, aparentemente, significativa na redução do dano. Os valores obtidos com a força de aperto de 8 kN e avanço por dente de 0.0775 e 0.11 mm/dente são maiores do que os correspondentes para a situação sem aperto.

Com a velocidade de rotação de 20 000 rpm (figura 4.22 c)) em todos os ensaios com aperto a maior percentagem de redução do dano ocorre quando se utiliza avanço por dente de

0.055 mm/dente. Com a utilização de avanço por dente de 0.0775 e 0.11 mm/dente, com excepção da força de aperto de 8 kN, o aumento do avanço não parece influenciar o dano.

Para qualquer valor de velocidade utilizado, os ensaios realizados com força de aperto de 8 kN evidenciaram piores resultados com utilização de avanço por dente de 0.11 mm/dente, sendo o factor de delaminação sempre superior ao do caso similar sem aperto.

Finalmente, o mesmo tipo de análise foi realizado para os provetes de 6 mm de espessura. Em primeiro lugar verificou-se a variação dos factores de delaminação e força axial em função da força de aperto com a utilização de avanço por dente de 0.055 mm/dente.

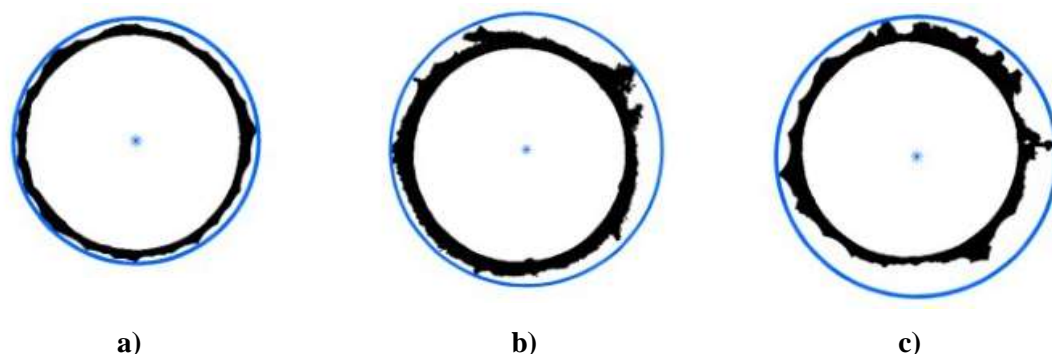


**Figura 4.23-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto (e = 6 mm;  $f_z = 0.055$  mm/dente)

Tal como para as espessuras anteriormente discutidas, o comportamento dos factores de delaminação é idêntico e o dano tende a diminuir com o aumento da força de aperto até 4 kN. Neste caso, os valores mais altos do factor de delaminação ocorrem para os ensaios executados sem força de aperto e com força de aperto de 6 kN e os valores mais baixos ocorrem para os ensaios com força de aperto de 4 kN.

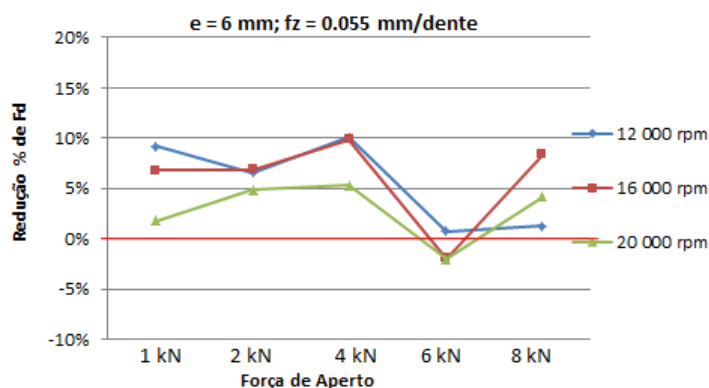
Uma vez mais não se conseguiu estabelecer relação entre a força axial e o factor de delaminação.

A figura 4.24 ilustra alguns exemplos de imagens do dano obtido. Novamente, a imagem do dano obtida no ensaio com força de aperto de 4 kN é mais regular do que as restantes.



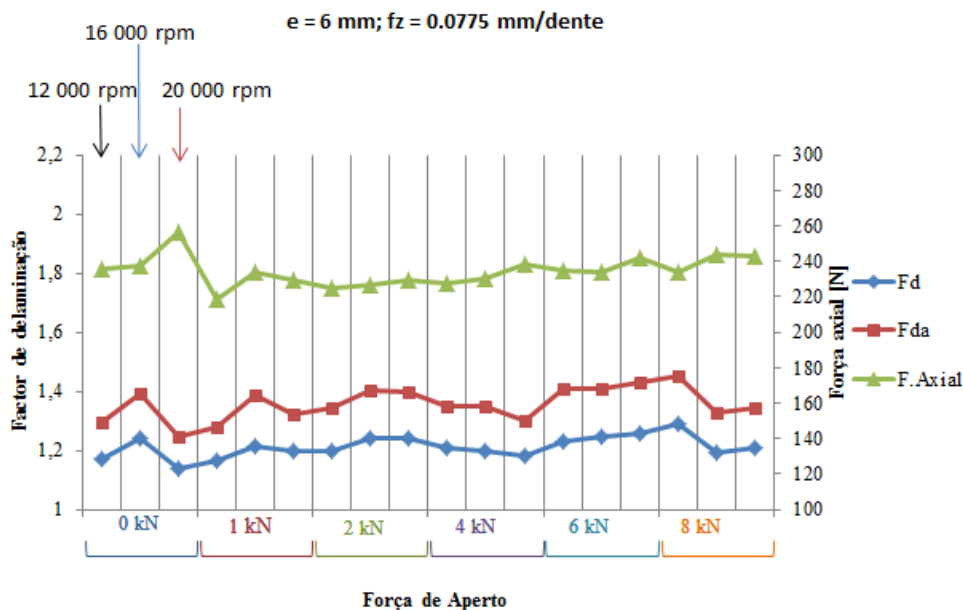
**Figura 4.24-** Representação do dano ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ )  
a) Aperto de 4 kN e  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; c) Aperto de 6 kN e  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$

A figura 4.25 apresenta os resultados obtidos para a redução percentual do dano em função da força de aperto para as diferentes velocidades de rotação e avanço por dente de 0,055 mm/dente. Pode-se observar que o comportamento da redução do factor de delaminação é idêntico para todas as velocidades utilizadas. Evidencia-se ainda a pouca influência da velocidade de rotação sobre a redução do factor de delaminação.



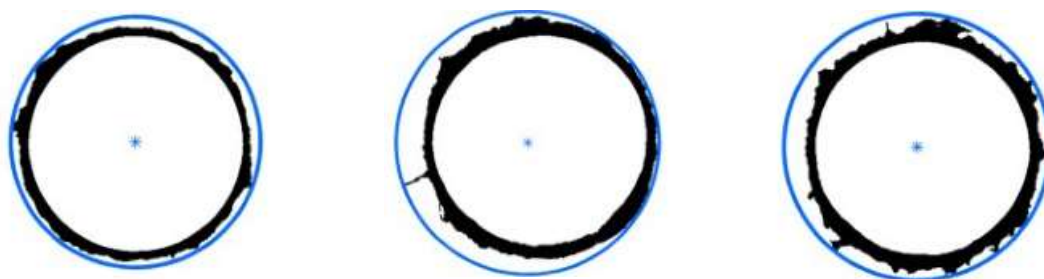
**Figura 4.25-** Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.055 \text{ mm/dente}$ )

A figura 4.26 apresenta a variação dos factores de delaminação e força axial em função da força de aperto para o provete de seis milímetros de espessura e avanço por dente de 0.0775 mm/dente. Como tem vindo a ser observado ao longo desta discussão de resultados, o comportamento dos factores de delaminação é idêntico. Os resultados obtidos para as várias forças de aperto são muito idênticos, sendo os respeitantes ao aperto de 6 kN os mais elevados. A força axial apresentou um comportamento pouco variável. Os valores mais altos deste parâmetro ocorreram sem a utilização de aperto.



**Figura 4.26-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

Alguns exemplos das imagens obtidas para quantificação do factor de delaminação e que representam o dano, são ilustrados na figura 4.27.

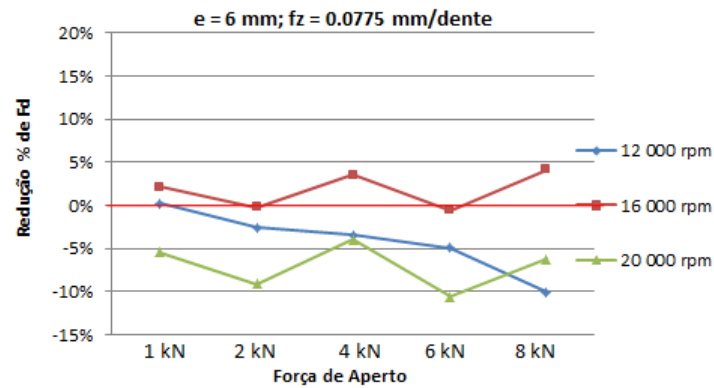


**Figura 4.27-** Representação do dano ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

a) Aperto de 4 kN e  $S = 20\,000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 16\,000 \text{ rpm}$ ; c) Aperto de 6 kN e  $S = 20\,000 \text{ rpm}$

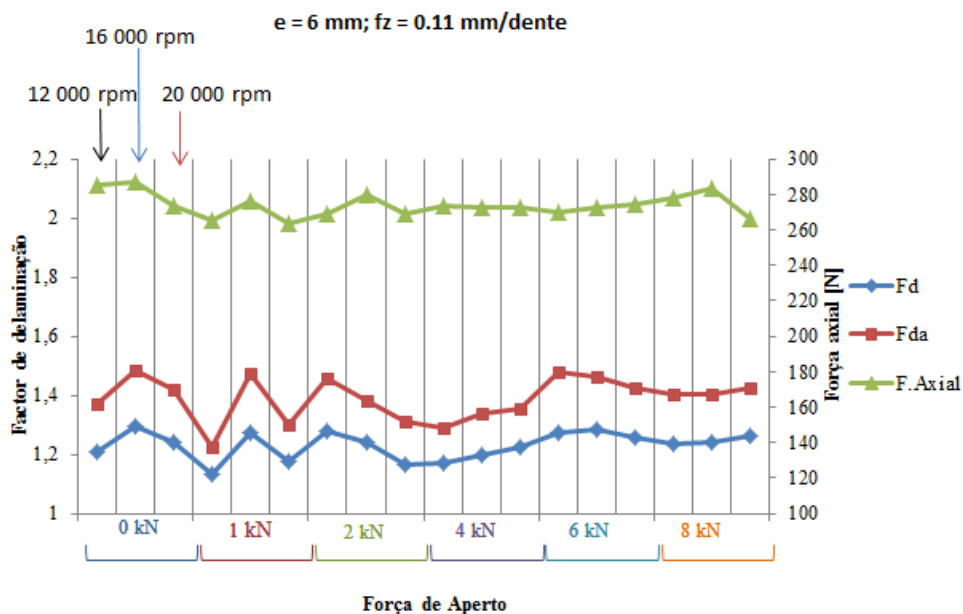
Na figura 4.28 pode-se observar que só existe redução do dano nos ensaios em que se utilizou velocidade de rotação de 16 000 rpm. Para os restantes ensaios, o dano foi sempre superior ao gerado sem aplicação de força de aperto. Novamente, a velocidade de rotação não parece ter influência na redução do dano.



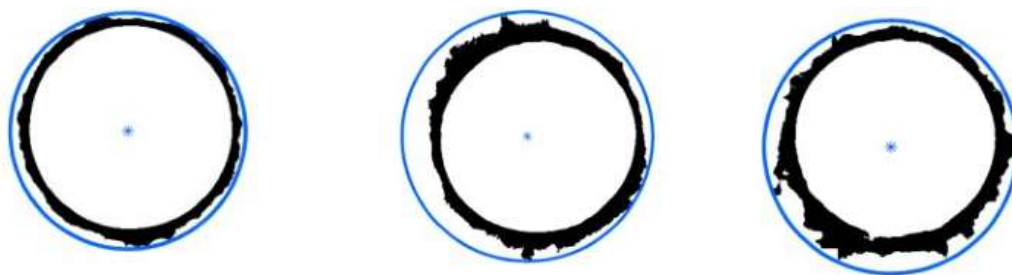


**Figura 4.28-** Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )

A variação dos factores de delaminação e força axial em função da força de aperto para o provete de 6 mm de espessura e avanço 0.11 mm/dente está representada na figura 4.29. Os valores mais baixos e o melhor comportamento do dano ocorrem para os ensaios com força de aperto de 4 kN e novamente aumentam com a força de aperto de 6 e 8 kN. A influência da força axial sobre o dano não é evidente. A representação de alguns exemplos do dano obtido está ilustrada na figura 4.30.



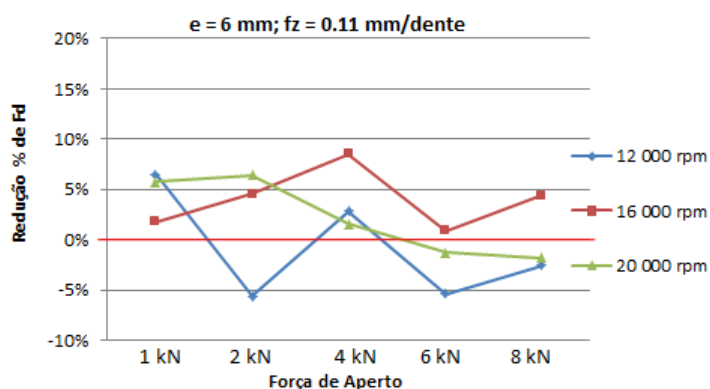
**Figura 4.29-** Variação dos factores de delaminação e força axial com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )



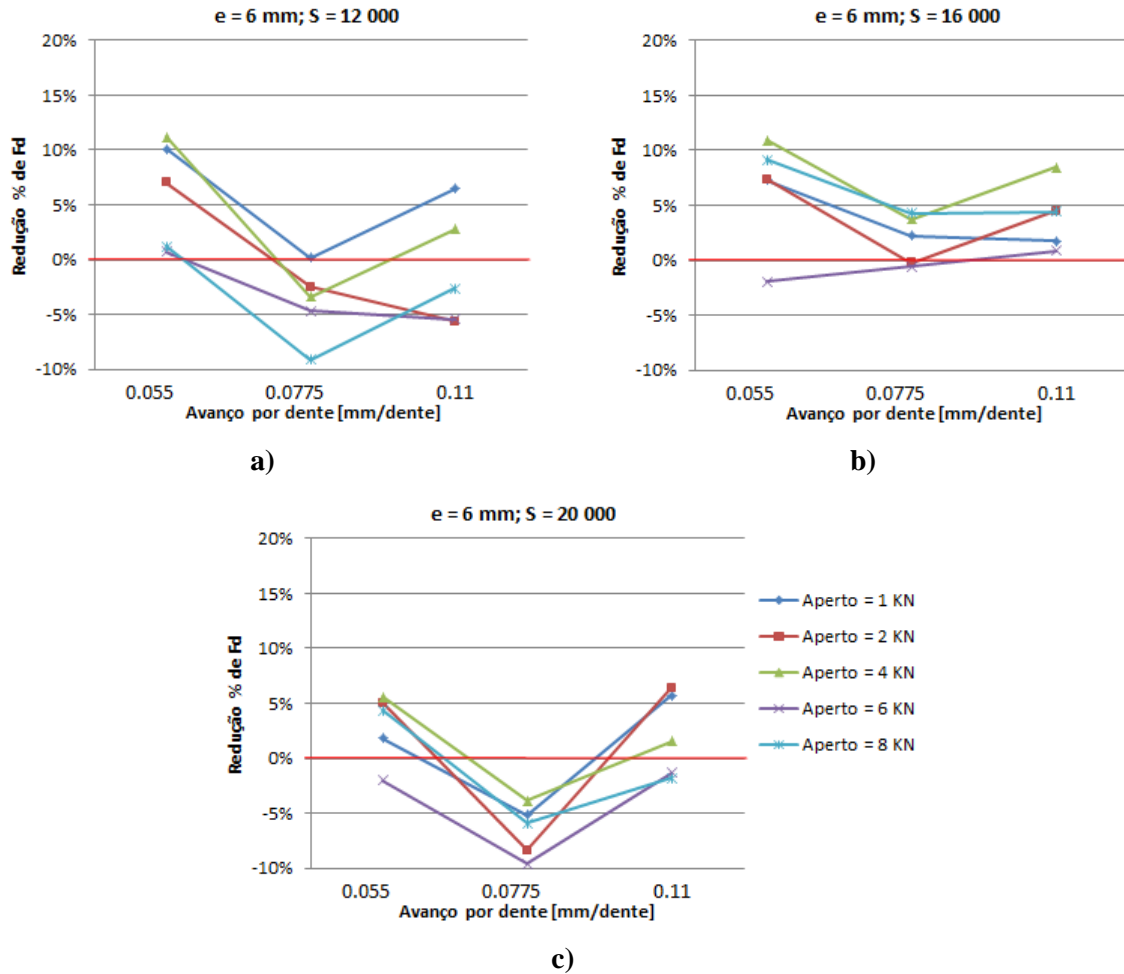
**Figura 4.30-** Representação do dano ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )

a) Aperto de 4 kN e  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; b) Sem aperto (0 kN) e  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$ ; c) Aperto de 6 kN e  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$

Ao analisar os resultados da redução percentual do factor de delaminação em função da força de aperto para as diferentes velocidades de rotação e avanço por dente de 0,11 mm/dente (figura 4.31), observa-se que com os apertos de 4, 6 e 8 kN a maior percentagem de redução do dano ocorre com a velocidade de 16 000 rpm. Aparentemente a influência da velocidade não é significativa na redução do dano para o caso em estudo.



**Figura 4.31-** Redução percentual do dano para diferentes velocidades de rotação com a força de aperto ( $e = 6 \text{ mm}$ ;  $f_z = 0.11 \text{ mm/dente}$ )

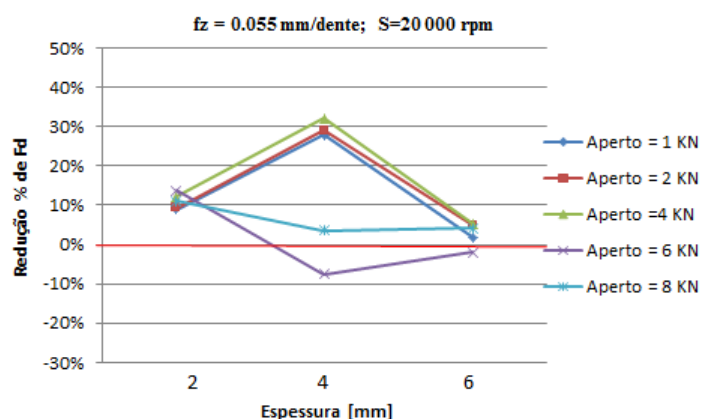


**Figura 4.32-** Redução percentual do factor de delaminação com o avanço por dente ( $e = 6$  mm)  
a)  $S = 12\ 000$  rpm; b)  $S = 16\ 000$  rpm; c)  $S = 20\ 000$  rpm

Na figura 4.32 pode-se verificar que para qualquer velocidade de rotação a menor percentagem de redução do dano ocorre com o avanço por dente de 0.0775 mm/dente. Para este avanço por dente e velocidades de 12 000 e 20 000 rpm os valores do factor de delaminação foram superiores aos obtidos nos ensaios sem aperto. Para todas as velocidades a redução obtida com a utilização de avanço por dente de 0.055 e 0.11 mm/dente é semelhante.

Os resultados foram até aqui apresentados e discutidos em função da espessura do provete, variando os parâmetros de corte. Em seguida apresentam-se os resultados dos mesmos parâmetros aqui discutidos com a variação da espessura dos provetes.

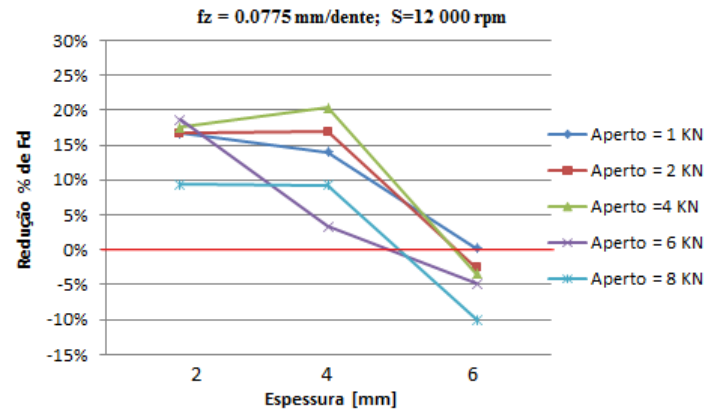
A figura 4.33 mostra os resultados da redução percentual do dano com a variação da espessura nos ensaios realizados com avanço por dente de 0.055 mm/dente e velocidade de rotação de 20 000 rpm.



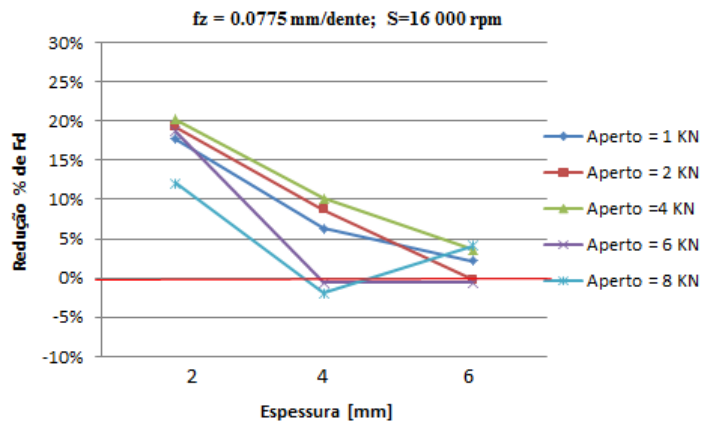
**Figura 4.33-** Redução percentual do factor de delaminação com a espessura ( $f_z = 0.055$  mm/dente;  $S = 20\,000$  rpm)

Nota-se que com excepção dos apertos de 6 e 8 kN a maior percentagem de redução do dano ocorre para o provete de 4 mm de espessura, sendo esta mais evidente quando se utilizou uma força de aperto de 4 kN. Estes resultados também foram verificados nos ensaios em que se utilizou velocidade de rotação de 12 000 e 16 000 rpm, sendo a única diferença o comportamento do aperto de 6 kN que com a velocidade de 12 000 rpm tem o mesmo comportamento que os restantes. Para a velocidade de 16 000 rpm a redução do dano tende a diminuir com o aumento da espessura. As figuras correspondentes às velocidades de rotação de 12 000 e 16 000 rpm podem ser visualizados em anexo (Anexo D).

De igual forma verificou-se a influência da variação da espessura sobre a redução percentual do dano com a utilização do avanço por dente de 0.0775 mm/dente e 0.11 mm/dente. Os resultados são apresentados nas figuras 4.34 e 4.35, respectivamente.



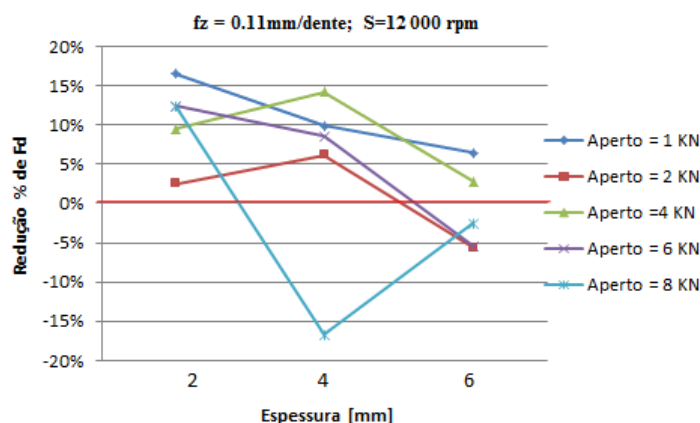
a)



b)

**Figura 4.34-** Redução percentual do factor de delaminação com a espessura ( $f_z = 0.0775 \text{ mm/dente}$ )  
a)  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; b)  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$

A figura 4.34 a) mostra que os resultados obtidos com a utilização da velocidade de rotação de 12 000 rpm e provetes de 2 e 4 mm apresentam comportamentos similares, com excepção da situação de força de aperto de 6 kN, em que a maior redução do dano ocorre para o provete de 2 mm de espessura. É de notar que com a utilização de qualquer força de aperto a menor percentagem de redução ocorre para o provete de 6 mm de espessura. Na figura 4.34 b) que corresponde à utilização da velocidade de rotação de 16 000 rpm a maior percentagem de redução do dano ocorre para o provete de 2 mm de espessura. A percentagem de redução do dano tende a diminuir com o aumento da espessura (com excepção do aperto de 8 kN). Para a velocidade de 20 000 rpm o comportamento é idêntico a este último e a figura ilustrativa encontra-se em anexo (Anexo D).

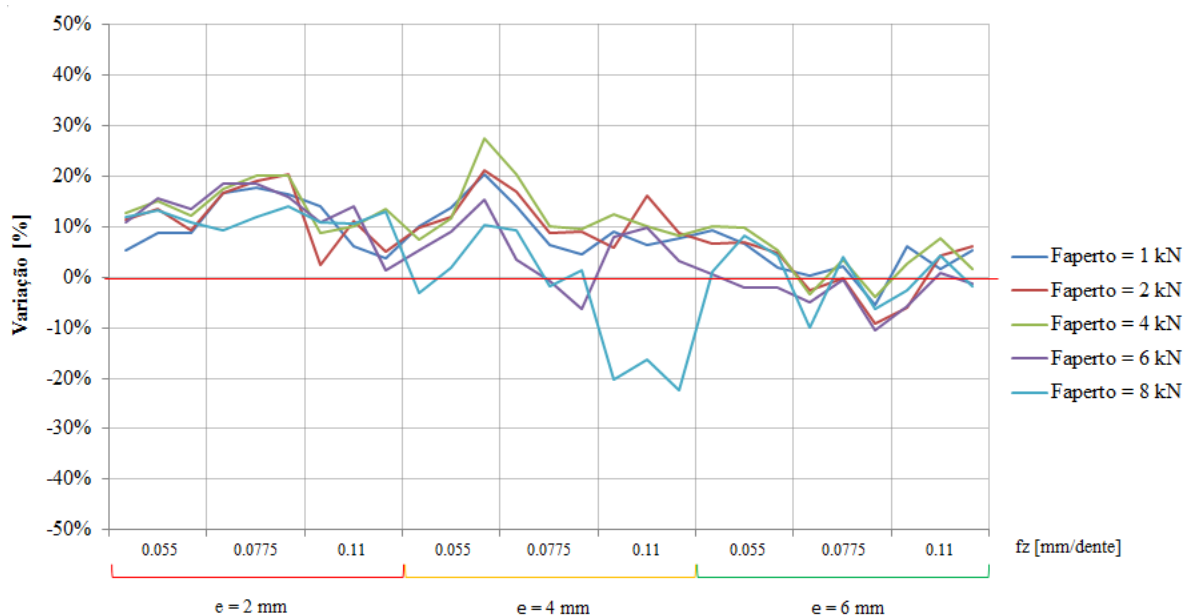


**Figura 4.35-** Redução percentual do factor de delaminação com a espessura ( $f_z = 0.11$  mm/dente;  $S = 12\,000$  rpm)

Para o avanço por dente de 0.11 mm/dente não há uma tendência clara no comportamento da redução do dano, pela utilização das várias forças de aperto, com a variação da espessura do provete. O mesmo comportamento foi verificado para as velocidades de 16 000 e 20 000 rpm (apresentadas no Anexo D). Neste caso, aparentemente, a variação da espessura não apresentou influência na redução do dano.

A figura 4.36 apresenta todos os resultados obtidos da variação percentual do dano em função da variação da espessura do provete onde é possível visualizar que os valores obtidos para o provete de 2 mm de espessura foram sempre superiores aos obtidos sem aperto, independentemente do avanço por dente ou da velocidade de rotação utilizados. Os valores mais elevados para o factor de delaminação foram observados nos ensaios que utilizaram avanço por dente de 0.11 mm/dente. Dos resultados obtidos para o provete de 4 mm de espessura nota-se que os valores mais altos do factor de delaminação correspondem aos ensaios onde se usaram forças de aperto de 6 e 8 kN, sendo que, nalguns casos, o dano foi maior do que o obtido sem aperto. Os valores mais baixos correspondem ao aperto de 4 kN. O provete de 6 mm de espessura teve um comportamento pouco variável em função da força de aperto e foi o que apresentou mais ensaios nos quais os valores do dano foram superiores aos obtidos sem aperto.

Considerando a totalidade dos ensaios verificou-se que os ensaios onde se utilizou a força de aperto de 4 kN, para qualquer espessura do provete, foram aqueles que apresentaram sempre os valores mais baixos do factor de delaminação, e aqueles onde se usaram forças de aperto de 6 e 8 kN foram sempre os mais elevados.

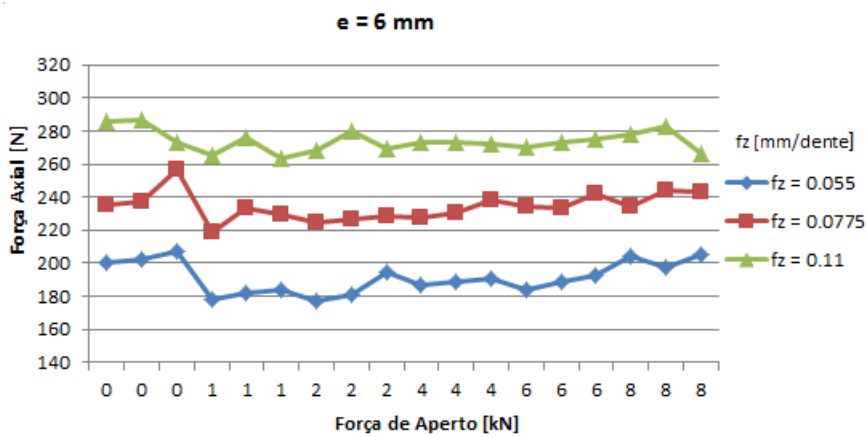
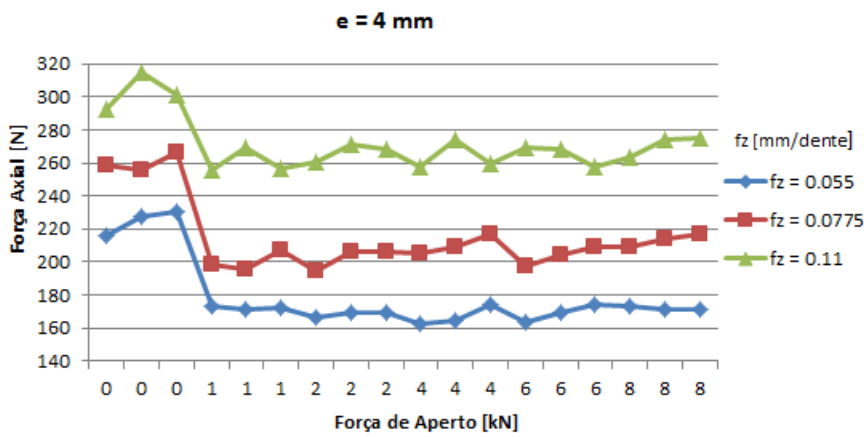
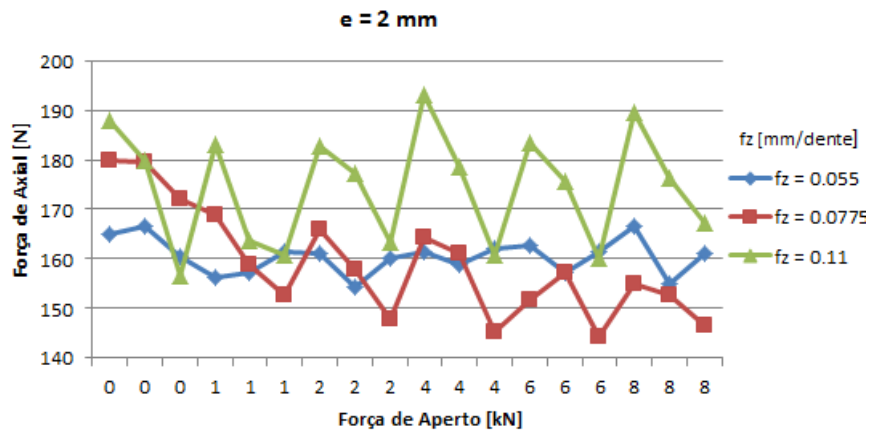


**Figura 4.36-** Redução percentual do factor de delaminação com a espessura para os diferentes avanços

A figura 4.37 representa os resultados da força axial obtidos dos ensaios para cada provete considerando os diferentes avanços.

Os resultados obtidos da força axial para o provete de 2 mm (Figura 4.37 a)) mostram que não existem grandes variações da força axial com o aumento do avanço por dente, embora o avanço por dente de 0.11 mm/dente tenha apresentado valores superiores aos restantes. Os resultados com a utilização dos avanços por dente de 0.0775 e 0.11 mm/dente apresentaram comportamentos idênticos. Para os provetes de 4 e 6 mm de espessura (Figuras 4.37 b) e c)) o aumento do avanço por dente aumentou a força axial. Este resultado vai de encontro ao obtido por *Krishnaraj* [26] que realizou a sua investigação em condições de corte idênticas às aqui apresentadas e observou resultados idênticos. Ambos os provetes apresentaram o maior valor da força axial nos ensaios sem aperto. No entanto, neste trabalho, estes foram os últimos ensaios efectuados, logo é possível que tenham sido afectados pelo desgaste da ferramenta. Assim, pode ter sido a razão pela qual a força axial tenha aumentado. Segundo estudos efectuados, o desgaste da ferramenta está directamente relacionado com a força axial [8, 24, 26].

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com as referências consultadas que realizaram estudos em condições de corte semelhantes, apesar da limitação de resultados passíveis de comparação com os do estudo aqui realizado, foi possível observar que os valores da força axial estão dentro da mesma gama de valores e apresentam comportamentos idênticos com o aumento do avanço [9, 28]. Não se encontraram, na literatura, valores de factor de delaminação obtidos para condições similares.



**Figura 4.37-** Comportamento da força axial com o avanço por dente  
a)  $e = 2$  mm; b)  $e = 4$  mm; c)  $e = 6$  mm



# 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

## 5.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizado um conjunto de ensaios com o objectivo de estudar a influência do aperto na minimização do defeito de delaminação devido ao processo de furação a alta velocidade de materiais compósitos para diferentes condições de corte. Com este estudo foi possível estabelecer condições de maquinagem que podem diminuir a ocorrência do defeito de delaminação e reduzir o tempo da operação. Como mencionado anteriormente, existem poucos estudos sobre furação de alta velocidade de materiais compósitos, e dos estudos efectuados a maioria concentra-se no desgaste da ferramenta de corte [9-11, 26,28].

Realizou-se o estudo da influência do aperto na minimização do dano utilizando provetes de três espessuras diferentes (2, 4, e 6 mm) e uma broca em metal duro (k20), helicoidal de 5 mm de diâmetro. A influência da força de aperto sobre a redução do dano em condições de alta velocidade foi demonstrada.

Com o estudo aqui efectuado foi possível chegar a conclusões tais como:

- Não foi evidente a influência da velocidade de rotação na redução do dano.  
Não se conseguiu esclarecer inequivocamente o mecanismo do processo uma vez que seria necessário realizar mais ensaios. A representação gráfica da variação do dano com a velocidade de rotação foi realizada com apenas 3 pontos. No entanto, foi possível encontrar valores deste parâmetro que efectivamente permitem reduzir o dano de delaminação.
- O avanço por dente influencia o dano, mas esta influência varia com a espessura do material.  
Os ensaios onde se obtiveram valores mais baixos do factor de delaminação correspondem à utilização do avanço por dente de 0.0775 mm/dente.
- A força axial é fortemente dependente do avanço por dente e não depende da força de aperto aplicada.
- A força de aperto tem grande influência na redução do dano.  
Provou diminuir a ocorrência do dano com as três espessuras diferentes. A maior redução do dano foi registada quando se utilizou força de aperto de 4 kN, independentemente da espessura do material. A força de aperto a partir de 6 kN demonstrou ser excessiva provocando deformação no material. A utilização deste sistema de fixação permite obter uma forma mais regular do dano.

- Em termos de produção industrial, a utilização de um sistema de fixação com força de aperto controlado pode ter um grande impacto, quando se realiza o processo de furação de alta produtividade (velocidades de corte e de avanço elevadas), pois permite taxas de remoção do material elevado com redução do dano.

A tabela abaixo resume as melhores condições de corte, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, para a furação de alta velocidade de material compósito consoante a espessura.

**Tabela 5.1-** Condição óptima de maquinagem estabelecida com a realização deste trabalho

Espessura do Provete [mm]	Velocidade de Rotação (S [rpm])	Avanço (fz [mm/dente])	Força de Aperto [KN]
2	12.000 a 20.000	0,0775	4 KN
4	20.000	0,055	4 KN
6	16.000	0,055	4 KN

## 5.2 Trabalhos Futuros

De modo a completar o estudo aqui desenvolvido seria necessária a realização de mais ensaios para ser possível a obtenção de dados complementares para uma melhor definição dos mecanismos do processo. Neste trabalho, devido a indisponibilidade de recursos, nomeadamente de material, não nos foi possível realizar mais ensaios.

Na realização da componente experimental foi muito importante a percepção do dano na selecção da área de interesse para o respectivo cálculo do factor de delaminação. Utilizou-se um programa desenvolvido especialmente para esta finalidade em *MatLab*, mas verificou-se não responder a algumas situações mais imprevistas no que diz respeito ao dano obtido. Verificou-se que o algoritmo desenvolvido ainda depende da sensibilidade do utilizador e seria interessante a sua melhoria e aperfeiçoamento de modo a não existir essa dependência.

Seria interessante avaliar a delaminação do furo realizado com o sistema de fixação desenvolvido em toda a espessura do material. Neste trabalho utilizou-se apenas a radiografia por ser o equipamento disponível, o que nos permitiu obter apenas a extensão total do dano. A utilização de outras técnicas de END, como por exemplo a tomografia axial computadorizada, seria muito interessante não só para avaliar a ocorrência do defeito mas também para comparar os resultados obtidos.

A configuração do sistema de fixação dos provetes desenvolvido para este trabalho permite, por acção do aperto, exercer uma tensão de contacto nos provetes. A utilização de forças de aperto a partir de 6 kN provou provocar um esmagamento nas fibras dos provetes. Seria interessante e ao mesmo tempo importante fazer um estudo do comportamento do componente furado quando sujeito a tais tensões de modo a averiguar o grau de importância do dano gerado e comprovar se este tipo de dano põe em causa o bom funcionamento dos componentes e a afecta a sua vida útil.



## Referências Bibliográficas

- [1] P. E. J. Flewitt & R. K. Wild, “*Physical Methods for Materials Characterization: Graduate student series in materials science and engineering*”, London, 0-7503-0320-4, 1994.
- [2] M. S. F Moura, A. B. Morais & A. G. Magalhães, “*Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*”, 2ª Edição, Publindústria, 2005.
- [3] V. Schulze, C. Becke, K. Weidenmann, and S. Dietrich, “*Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards*”, Journal of Materials Processing Technology, 211, pp. 329–338, 2011.
- [4] E. Capello, A. Langella, L. Nele, et al., *Drilling Polymeric Matrix Composites*, in Machining, J. P. Davim, Ed., Springer London, pp. 167–194, 2008.
- [5] Defu Liu, “*A review of mechanical drilling for composite laminates*”, Composite Structures, 94, pp.1265-1279, 2012.
- [6] H. Hocheng & C. C. Tsao, “*Comprehensive Analysis of delamination in drilling of composite materials with various drills bits*”, Journal of Materials Processing Technology, 140, pp.335-339, 2003.
- [7] C. M. M. Machado, “*Empirical Models for Quantification of Machining Damage in Composite Materials*” Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Lisboa Janeiro 2013.
- [8] Shang-Lin Gao; Jang-Kyo Kim, “*Scanning Acoustic Microscopy as a Tool for Quantitative Characterization of Damage in CFRPs*”, Composites Science and Technology, vol.59, pp.345-354, 1999.
- [9] S. C. Lin & I. K. Chen, “*Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed*”, Wear, vol 194, pp. 156–162, 1996.
- [10] V Gaitonde, S Karnik, J Rubio, A Correia, A Abrao, & J. Davim, “*Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites*”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 203, pp. 431–438, 2008
- [11] D. Iliescu, D. Gehin, M. E. Gutierrez, & F. Girot, “*Modeling and tool wear in drilling of CFRP*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 50, pp. 204–213, 2010.
- [12] F. L. Matthews & R. D. Rawlings, “*Composite materials: Engineering and science*”, London UK, CRC press, 0-8493-0621-3, 2002.
- [13] Krishan K. Chawla, “*Composite Materials: science and Engineering*”, 2ª Edição, Alabama, 0-387-98409-7, 1998.
- [14] Airbus. A350 XWB – Airframe composition, [online].  
<http://www.a350xwb.com/#sensational/shape/> (Consultado em 03/2013).

- [15] Boeing. 787 Dreamliner: Structural Materials Distribution, [Online]. [http://www.newairplane.com/787/design\\_highlights/#/visionary-design/composites/advanced-composite-use](http://www.newairplane.com/787/design_highlights/#/visionary-design/composites/advanced-composite-use) (Consultado em 03/2013).
- [16] B. S. Hayes & L. M. Gammon, “*Optical Microscopy of Fiber-Reinforced composites*”, [S.l.], ASM International, 978-1-61503-044-6, 2010.
- [17] L. M. P. Durão et al, “*Delaminação na Furação de Laminados Carbono/Epóxido*” CIBEM 10, Porto, 2011.
- [18] S. Rawat, H. Attia, “*Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites*”, Wear, Elsevier, vol.267, pp.10022-1030, 2009.
- [19] L. M. P Durão, M. F. S. F. de Moura & A. T. Marques, “*Numerical Prediction of Delamination onset in Carbon/Epoxy Composites Drilling*”, Porto, ELSEVIER, pp. 2767-2778, 2008.
- [20] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, V. H. C. de Albuquerque, R. S. T. João Manuel, “*Avaliação da Delaminação após Furação em Compósitos Laminado*”, Porto, 2010.
- [21] U. A. Khashaba, “*Delamination in drilling GFR-thermoset composites*”, Composite Structures, vol.63, pp. 314-327, 2004.
- [22] I. Shyha, S. L. Soo, D. Aspinwall, and S. Bradley, “*Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites*,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, pp. 1023–1034, 2010.
- [23] C. K. H. Dharan & M. S. Won, “*Machining Parameters for an Intelligent Machining System for Composite Laminates*”, International Journal of Machine Tools and manufacture, vol.40, pp.415-426, 2000.
- [24] C. C. Tsão & H. Hocheng, “*Evaluation of thrust force and Surface Roughness in drilling composite material using Taguchi Analysis and Neural Network*”, Journal of Materials Processing Technology, vol.203, pp.342-348, 2008.
- [25] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. Albuquerque, A. T. Marques, A. P. M. Baptista, “*Drilling of Carbon Fibre Reinforced Laminates: A Comparative Analysis of Five Different Drills on Thrust Force, Roughness and Delamination*”, Advanced Materials Forum V, 2010.
- [26] V. Krishnaraj et al, “*Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates*,” Composites Part B: Engineering, vol. 43, pp.1791–1799, 2012.
- [27] J. Sedlacek & M. Slany, “*Analysis of Delamination in Drilling of composite Materials*”, Republica checa, M M Science Journal, pp.194-197, 2010. [http://www.mmscience.eu/archives/MM\\_Science\\_201010.pdf](http://www.mmscience.eu/archives/MM_Science_201010.pdf) (consultado em 12/2012).
- [28] S. Rawat, H. Attia, “*Characterization of the dry higt speed drilling processo f woven composites using machinability maps approach*”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.58, pp.105-108, 2009.
- [29] J. P. Davim, J. Campus Rubio, A. M. Abrão, “*A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates*”, vol.67, pp.1939-1945, 2007.
- [30] Wen-Chou Chen, “*Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates*”, Pergamon, pp.1097-1107, 1996

## Referências Bibliográficas

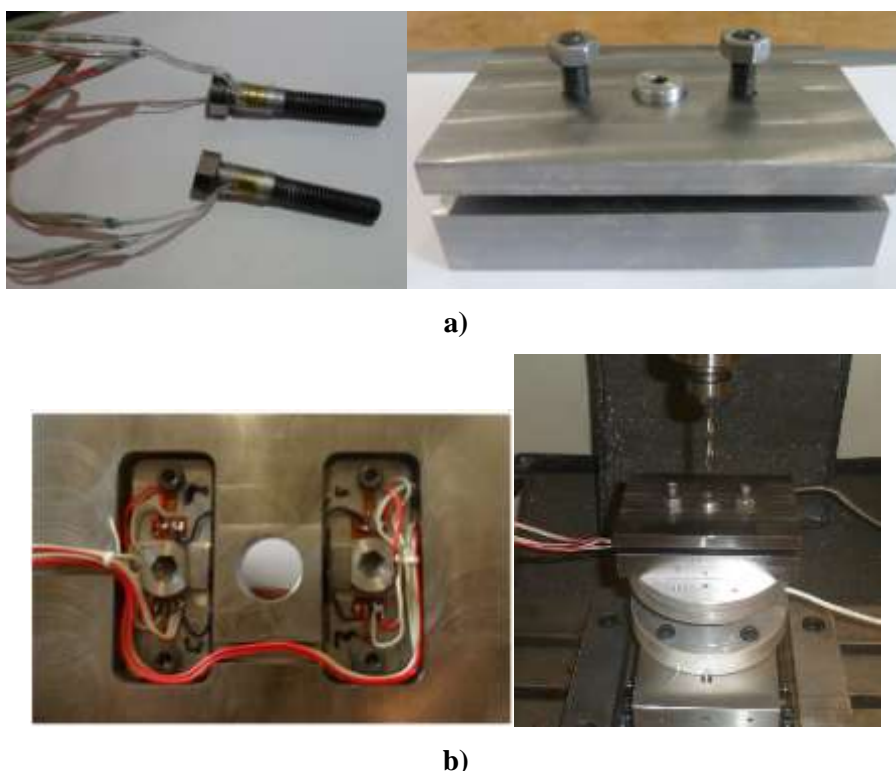
- [31] American Society for Nondestructive Testing. [online]. Disponível em: <http://www.asnt.org/ndt/primer1.htm> (Consultado em 11/2012).
- [32] Pauli vaara; Jukka Leinonen, “*Technology Survey on NDT of Carbon-fiber Composites*”, Tornio University of Applied Sciences Series B, Finland, 2012.
- [33] G. Caprino & V. Tagliaferri, “*Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 35, pp. 817–829, 1995.
- [34] P. A Filomena & J. Barrata & P. Barros, “*Ensaaios Não Destrutivos*” ISQ, 1992.
- [35] Shang-Lin Gao; Jang-Kyo Kim, “*Scanning Acoustic Microscopy as a Tool for Quantitative Characterization of Damage in CFRPs*”, ELSEVIER, Composite science and technology, Vol.59, pp. 345-354, 1999.
- [36] Ajay Kapadia, “*Non Destructive testing of Composite Materials*”, NCN. <http://www.compositesuk.co.uk/LinkClick.aspx?fileticket=14Rxzdjdkjw=&>. (consultado em 01/2013).
- [37] D. N. R. da Silva, “*Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP*”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Lisboa, Maio 2013.
- [38] J. Shigley and C. Mischke, “*Mechanical Engineering Design, Fifth ed. McGraw-Hill*”, 1989.
- [39] Luís Veiga da Cunha, “*Desenho Técnico*”, Gulbenkian, 2004.

## *Referências Bibliográficas*



## Anexo A

### Sensores desenvolvidos no âmbito deste trabalho



**Figura A. 1-** Sensores desenvolvidos: a) Instrumentação dos parafusos; b) instrumentação das placas de suporte aos parafusos.

A figura A.1 a) representa o primeiro sensor desenvolvido cujo objectivo foi a medição do aperto aplicado através da deformação lida pelos extensómetros colados aos parafusos. Este mecanismo não foi utilizado porque durante a calibração os extensómetros apresentaram anomalias no funcionamento, estas anomalias estão ligados ao tamanho e tipo do extensómetro utilizado que não é apropriado para este tipo de aplicação. Devido a indisponibilidade de recursos para continuar com o primeiro sensor foi construído o segundo sensor (figura A.1 b) em que a medição do aperto aplicado seria efectuada através da deformação lida pelos extensómetros colados as placas, as placas funcionavam como vigas encastradas que quando aplicado o aperto elas ficam sujeitas a uma carga centrada e com esta carga seria lido a deformação sofrida pelas placas. Devido ao excessivo aperto aplicado nas experimentações as placas deformaram-se plasticamente, tendo ficado inutilizadas. Pela falta de recursos económicos não foi possível a sua substituição. Como não havia

tempo suficiente para melhorar este sensor fez-se algumas adaptações que deu origem ao sistema de aperto apresentado na no capítulo do procedimento experimental (capítulo 4).

## Anexo B

### Cálculo do momento de aperto

O aperto referido ao longo deste trabalho como já mencionado foi introduzido com uso de uma chave dinamométrica. Para isso fez-se a conversão da força em momento de aperto do parafuso com uso da fórmula abaixo [38].

$$T_a = F \frac{d_m(\pi\mu d_m \sec(\alpha) + l}{2(\pi d_m - \mu l \sec(\alpha))} + F\mu_c \frac{d_c}{2} \quad \text{Equação B. 1}$$

Onde  $F$  é a força de aperto a ser aplicado. A tabela abaixo demonstra o significado e o respectivo valor usado para cada um dos elementos que constituem a equação.

**Tabela B. 1-** Dimensões nominais das porcas e parafusos [39]

$d_m$ (diâmetro médio [mm])	$\mu$ (coeficiente de atrito)	$l$ (passo real ( avanço por rotação)[mm])	$\alpha$ (ângulo de rosca [°])	$\mu_c$ (factor de atrito na coroa)	$d_c$ (diâmetro característico da coroa de atrito [mm])
7.118	0.2	1.25	30	0.2	0.6

**Tabela B. 2-** Momento de Aperto calculado pela equação B.1

Força de Aperto [KN]	Momento [N m]
<b>1</b>	2.81
<b>2</b>	5.62
<b>4</b>	11.24
<b>6</b>	16.87
<b>8</b>	22.49



## Resultados experimentais

**Tabela C. 1-** Resultados experimentais dos factores de delaminação e força Axial para o provete de 2 mm de espessura e avanço 0.055; 0.0775 e 0.11 mm/dente.

e [mm]	S [rpm]	fz [mm/dente]	F. Aperto [KN]	Fd	Fda	F. Axial [N]
2	12.000	0.055	0	1.2855	1.4259	164.9376
2	16.000	0.055	0	1.3443	1.5069	166.5626
2	20.000	0.055	0	1.3098	1.4725	160.4651
2	12.000	0.055	1	1.2159	1.3106	156.2434
2	16.000	0.055	1	1.2272	1.3216	157.3422
2	20.000	0.055	1	1.1937	1.2876	161.2888
2	12.000	0.055	2	1.1392	1.2098	161.2275
2	16.000	0.055	2	1.163	1.2496	154.1722
2	20.000	0.055	2	1.1885	1.2645	160.1800
2	12.000	0.055	4	1.1222	1.1964	161.3074
2	16.000	0.055	4	1.1407	1.2213	158.7425
2	20.000	0.055	4	1.1494	1.2391	162.1681
2	12.000	0.055	6	1.1441	1.2248	162.6268
2	16.000	0.055	6	1.136	1.2137	157.2665
2	20.000	0.055	6	1.1313	1.2004	161.2974
2	12.000	0.055	8	1.1332	1.2176	166.5352
2	16.000	0.055	8	1.1676	1.264	155.0695
2	20.000	0.055	8	1.1665	1.2469	160.9807
2	12.000	0.0775	0	1.3954	1.4725	179.7903
2	16.000	0.0775	0	1.433	1.6318	179.5676
2	20.000	0.0775	0	1.4464	1.6415	172.1573
2	12.000	0.0775	1	1.1624	1.2439	168.7227
2	16.000	0.0775	1	1.1796	1.2788	158.7709
2	20.000	0.0775	1	1.2102	1.3102	152.7677

*Anexo C - Resultados Experimentais*

<b>e [mm]</b>	<b>S [rpm]</b>	<b>fz [mm/dente]</b>	<b>F. Aperto [KN]</b>	<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial [N]</b>
2	12.000	0.0775	2	1.1624	1.2562	165.9044
2	16.000	0.0775	2	1.1581	1.2439	157.8880
2	20.000	0.0775	2	1.1533	1.2398	147.8601
2	12.000	0.0775	4	1.1504	1.2172	164.4199
2	16.000	0.0775	4	1.1442	1.2225	160.9534
2	20.000	0.0775	4	1.157	1.2434	145.1378
2	12.000	0.0775	6	1.1356	1.2197	151.7714
2	16.000	0.0775	6	1.1661	1.248	157.2632
2	20.000	0.0775	6	1.2184	1.3393	144.4269
2	12.000	0.0775	8	1.2653	1.4143	154.9762
2	16.000	0.0775	8	1.2602	1.3979	152.7384
2	20.000	0.0775	8	1.2425	1.3574	146.4563
2	12.000	0.11	0	1.4193	1.6422	187.8361
2	16.000	0.11	0	1.3955	1.6208	179.7692
2	20.000	0.11	0	1.3922	1.5633	156.4971
2	12.000	0.11	1	1.2185	1.3587	183.2031
2	16.000	0.11	1	1.3097	1.4674	163.6714
2	20.000	0.11	1	1.3404	1.5423	160.8851
2	12.000	0.11	2	1.3848	1.5734	182.8636
2	16.000	0.11	2	1.2408	1.3667	177.1224
2	20.000	0.11	2	1.3231	1.4978	163.5005
2	12.000	0.11	4	1.2964	1.4447	193.1662
2	16.000	0.11	4	1.2548	1.4025	178.5701
2	20.000	0.11	4	1.2037	1.3196	160.8833
2	12.000	0.11	6	1.2633	1.4237	183.3757
2	16.000	0.11	6	1.2	1.3146	175.5080
2	20.000	0.11	6	1.3716	1.5343	160.0581
2	12.000	0.11	8	1.2636	1.4134	189.3899
2	16.000	0.11	8	1.2456	1.3644	176.2875
2	20.000	0.11	8	1.2109	1.3095	167.3227

**Tabela C. 2-** Resultados experimentais dos factores de delaminação e força axial para o provete de 4 mm de espessura e avanço 0.055; 0.0775 e 0.11 mm/dente

e [mm]	S [rpm]	Fz [mm/dente]	F. Aperto [KN]	Fd	Fda	F. Axial [N]
4	12.000	0.055	0	1.4788	1.733	215.8479
4	16.000	0.055	0	1.4887	1.7077	227.6232
4	20.000	0.055	0	1.6477	1.8852	230.6499
4	12.000	0.055	1	1.329	1.4842	172.9375
4	16.000	0.055	1	1.2817	1.3981	171.3264
4	20.000	0.055	1	1.3106	1.4408	171.8287
4	12.000	0.055	2	1.3354	1.5179	166.5526
4	16.000	0.055	2	1.3122	1.4803	169.7111
4	20.000	0.055	2	1.3002	1.4467	169.8234
4	12.000	0.055	4	1.3685	1.5891	162.8133
4	16.000	0.055	4	1.315	1.5001	164.5422
4	20.000	0.055	4	1.1954	1.3056	174.6588
4	12.000	0.055	6	1.3998	1.6149	163.5866
4	16.000	0.055	6	1.3537	1.5697	169.2459
4	20.000	0.055	6	1.3964	1.6471	174.6478
4	12.000	0.055	8	1.5253	1.9118	173.3329
4	16.000	0.055	8	1.4604	1.747	171.6916
4	20.000	0.055	8	1.4773	1.7857	171.4025
4	12.000	0.0775	0	1.3139	1.5042	258.9531
4	16.000	0.0775	0	1.3309	1.5575	255.3703
4	20.000	0.0775	0	1.2701	1.3914	266.1557
4	12.000	0.0775	1	1.2446	1.3615	198.5899
4	16.000	0.0775	1	1.2237	1.3475	195.3675
4	20.000	0.0775	1	1.2288	1.3427	207.4879
4	12.000	0.0775	2	1.2025	1.3247	194.3387
4	16.000	0.0775	2	1.1929	1.3233	205.8223
4	20.000	0.0775	2	1.1726	1.2736	205.8128
4	12.000	0.0775	4	1.1524	1.2489	205.4501
4	16.000	0.0775	4	1.1741	1.2913	209.3798
4	20.000	0.0775	4	1.165	1.266	216.4698
4	12.000	0.0775	6	1.3982	1.6879	197.4280

*Anexo C - Resultados Experimentais*

<b>e</b> <b>[mm]</b>	<b>S [rpm]</b>	<b>fz</b> <b>[mm/dente]</b>	<b>F. Aperto</b> <b>[KN]</b>	<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial</b> <b>[N]</b>
4	16.000	0.0775	6	1.314	1.5147	204.6456
4	20.000	0.0775	6	1.3698	1.6797	209.2788
4	12.000	0.0775	8	1.3139	1.5042	208.9995
4	16.000	0.0775	8	1.3309	1.5575	214.0451
4	20.000	0.0775	8	1.2701	1.3914	217.1362
4	12.000	0.11	0	1.3666	1.4847	292.9895
4	16.000	0.11	0	1.3591	1.4738	314.9514
4	20.000	0.11	0	1.3289	1.4799	300.7509
4	12.000	0.11	1	1.2431	1.3883	255.5390
4	16.000	0.11	1	1.2722	1.431	269.0062
4	20.000	0.11	1	1.227	1.3934	256.9847
4	12.000	0.11	2	1.2869	1.4347	260.1344
4	16.000	0.11	2	1.1409	1.2573	271.4228
4	20.000	0.11	2	1.213	1.3645	268.5825
4	12.000	0.11	4	1.1965	1.3418	257.7243
4	16.000	0.11	4	1.2203	1.3865	273.8380
4	20.000	0.11	4	1.2182	1.3684	259.4397
4	12.000	0.11	6	1.2588	1.4628	269.6118
4	16.000	0.11	6	1.2252	1.3774	268.6663
4	20.000	0.11	6	1.2849	1.4797	257.1505
4	12.000	0.11	8	1.6417	1.9081	263.7836
4	16.000	0.11	8	1.5794	1.8245	273.6852
4	20.000	0.11	8	1.6275	1.8247	274.9999



*Anexo C - Resultados Experimentais*

**Tabela C. 3-** Resultados experimentais dos factores de delaminação e força axial para o provete de 6 mm de espessura e avanço 0.055; 0.0775 e 0.11 mm/dente

e [mm]	S [rpm]	fz [mm/dente]	F. Aperto [KN]	Fd	Fda	F. Axial [N]
6	12.000	0.055	0	1.2856	1.4738	200.4768
6	16.000	0.055	0	1.2968	1.4868	202.5880
6	20.000	0.055	0	1.2415	1.4187	207.4780
6	12.000	0.055	1	1.1678	1.3021	178.0203
6	16.000	0.055	1	1.2089	1.3677	182.4145
6	20.000	0.055	1	1.2194	1.3522	183.8181
6	12.000	0.055	2	1.2016	1.3457	177.5922
6	16.000	0.055	2	1.2077	1.3514	181.3274
6	20.000	0.055	2	1.1817	1.3199	194.9334
6	12.000	0.055	4	1.1563	1.2615	186.8006
6	16.000	0.055	4	1.1689	1.3037	188.8080
6	20.000	0.055	4	1.176	1.2886	190.9809
6	12.000	0.055	6	1.2765	1.4437	184.1728
6	16.000	0.055	6	1.3219	1.4934	189.2022
6	20.000	0.055	6	1.2666	1.4669	192.7502
6	12.000	0.055	8	1.2698	1.4473	204.5898
6	16.000	0.055	8	1.1885	1.3545	197.8838
6	20.000	0.055	8	1.1898	1.34	205.1709
6	12.000	0.0775	0	1.1705	1.296	235.4815
6	16.000	0.0775	0	1.241	1.394	237.0121
6	20.000	0.0775	0	1.1379	1.2451	256.4354
6	12.000	0.0775	1	1.1681	1.2774	218.8841
6	16.000	0.0775	1	1.2142	1.3882	233.4386
6	20.000	0.0775	1	1.1996	1.3219	229.7064
6	12.000	0.0775	2	1.2002	1.3464	224.5742
6	16.000	0.0775	2	1.2433	1.4041	226.7538
6	20.000	0.0775	2	1.2417	1.3996	228.9563
6	12.000	0.0775	4	1.211	1.3498	227.8056
6	16.000	0.0775	4	1.1966	1.3492	229.9907
6	20.000	0.0775	4	1.1834	1.3022	238.4092
6	12.000	0.0775	6	1.2278	1.4075	234.6737

*Anexo C - Resultados Experimentais*

<b>e</b> <b>[mm]</b>	<b>S</b> <b>[rpm]</b>	<b>fz</b> <b>[mm/dente]</b>	<b>F. Aperto</b> <b>[KN]</b>	<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial</b> <b>[N]</b>
6	16.000	0.0775	6	1.2483	1.4103	233.8086
6	20.000	0.0775	6	1.2587	1.4312	241.7992
6	12.000	0.0775	8	1.288	1.4532	233.8680
6	16.000	0.0775	8	1.1899	1.3249	243.6745
6	20.000	0.0775	8	1.2089	1.3442	243.0842
6	12.000	0.11	0	1.206	1.3715	285.5047
6	16.000	0.11	0	1.2968	1.4868	286.8330
6	20.000	0.11	0	1.2415	1.4187	273.1921
6	12.000	0.11	1	1.1328	1.2267	265.1782
6	16.000	0.11	1	1.2744	1.4747	276.3173
6	20.000	0.11	1	1.1739	1.3	263.7620
6	12.000	0.11	2	1.2777	1.4595	268.5928
6	16.000	0.11	2	1.2406	1.3829	279.6478
6	20.000	0.11	2	1.167	1.3101	269.1499
6	12.000	0.11	4	1.173	1.2922	273.2086
6	16.000	0.11	4	1.1955	1.3384	272.6668
6	20.000	0.11	4	1.2227	1.3572	272.6295
6	12.000	0.11	6	1.2746	1.4785	270.0980
6	16.000	0.11	6	1.2856	1.4639	272.8495
6	20.000	0.11	6	1.258	1.4268	274.6884
6	12.000	0.11	8	1.2379	1.4027	278.0442

**Tabela C. 4-** Variação percentual do dano para o aperto de 1 kN

1 kN			Variação %		
Fd	Fda	F. Axial [N]	Fd	Fda	F. Axial [N]
1.2159	1.3106	156.2434	-5.7%	-8.8%	-5.6%
1.2272	1.3216	157.3422	-9.5%	-14.0%	-5.9%
1.1937	1.2876	161.2888	-9.7%	-14.4%	0.5%
1.1624	1.2439	168.7227	-20.0%	-18.4%	-6.6%
1.1796	1.2788	158.7709	-21.5%	-27.6%	-13.1%
1.2102	1.3102	152.7677	-19.5%	-25.3%	-12.7%
1.2185	1.3587	183.2031	-16.5%	-20.9%	-2.5%
1.3097	1.4674	163.6714	-6.6%	-10.5%	-9.8%
1.3404	1.5423	160.8851	-3.9%	-1.4%	2.7%
1.329	1.4842	172.9375	-11.3%	-16.8%	-24.8%
1.2817	1.3981	171.3264	-16.2%	-22.1%	-32.9%
1.3106	1.4408	171.8287	-25.7%	-30.8%	-34.2%
1.2446	1.3615	198.5899	-16.3%	-22.6%	-30.4%
1.2237	1.3475	195.3675	-6.7%	-9.2%	-30.7%
1.2288	1.3427	207.4879	-4.8%	-6.5%	-28.3%
1.2431	1.3883	255.5390	-9.9%	-6.9%	-14.7%
1.2722	1.431	269.0062	-6.8%	-3.0%	-17.1%
1.227	1.3934	256.9847	-8.3%	-6.2%	-17.0%
1.1678	1.3021	178.0203	-10.1%	-13.2%	-12.6%
1.2089	1.3677	182.4145	-7.3%	-8.7%	-11.1%
1.2194	1.3522	183.8181	-1.8%	-4.9%	-12.9%
1.1681	1.2774	218.8841	-0.2%	-1.5%	-7.6%
1.2142	1.3882	233.4386	-2.2%	-0.4%	-1.5%
1.1996	1.3219	229.7064	5.1%	5.8%	-11.6%
1.1328	1.2267	265.1782	-6.5%	-11.8%	-7.7%
1.2744	1.4747	276.3173	-1.8%	-0.8%	-3.8%
1.1739	1.3	263.7620	-5.8%	-9.1%	-3.6%

**Tabela C. 5-** Variação percentual do dano para o aperto de 2 kN

2 kN			Variação %		
Fd	Fda	F. Axial [N]	Fd	Fda	F. Axial [N]
1.1392	1.2098	161.2275	-12.8%	-17.9%	-2.3%
1.163	1.2496	154.1722	-15.6%	-20.6%	-8.0%
1.1885	1.2645	160.1800	-10.2%	-16.4%	-0.2%
1.1624	1.2562	165.9044	-20.0%	-17.2%	-8.4%
1.1581	1.2439	157.8880	-23.7%	-31.2%	-13.7%
1.1533	1.2398	147.8601	-25.4%	-32.4%	-16.4%
1.3848	1.5734	182.8636	-2.5%	-4.4%	-2.7%
1.2408	1.3667	177.1224	-12.5%	-18.6%	-1.5%
1.3231	1.4978	163.5005	-5.2%	-4.4%	4.3%
1.3354	1.5179	166.5526	-10.7%	-14.2%	-29.6%
1.3122	1.4803	169.7111	-13.5%	-15.4%	-34.1%
1.3002	1.4467	169.8234	-26.7%	-30.3%	-35.8%
1.2025	1.3247	194.3387	-20.3%	-26.0%	-33.2%
1.1929	1.3233	205.8223	-9.5%	-11.2%	-24.1%
1.1726	1.2736	205.8128	-9.8%	-12.3%	-29.3%
1.2869	1.4347	260.1344	-6.2%	-3.5%	-12.6%
1.1409	1.2573	271.4228	-19.1%	-17.2%	-16.0%
1.213	1.3645	268.5825	-9.6%	-8.5%	-12.0%
1.2016	1.3457	177.5922	-7.0%	-9.5%	-12.9%
1.2077	1.3514	181.3274	-7.4%	-10.0%	-11.7%
1.1817	1.3199	194.9334	-5.1%	-7.5%	-6.4%
1.2002	1.3464	224.5742	2.5%	3.7%	-4.9%
1.2433	1.4041	226.7538	0.2%	0.7%	-4.5%
1.2417	1.3996	228.9563	8.4%	11.0%	-12.0%
1.2777	1.4595	268.5928	5.6%	6.0%	-6.3%
1.2406	1.3829	279.6478	-4.5%	-7.5%	-2.6%
1.167	1.3101	269.1499	-6.4%	-8.3%	-1.5%

*Anexo C - Resultados Experimentais*

**Tabela C. 6-** Variação percentual do dano para o aperto de 4 kN

4 kN			Variação %		
<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial</b>	<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial</b>
1.1222	1.1964	161.3074	-14.6%	-19.2%	-2.3%
1.1407	1.2213	158.7425	-17.8%	-23.4%	-4.9%
1.1494	1.2391	162.1681	-14.0%	-18.8%	1.1%
1.1504	1.2172	164.4199	-21.3%	-21.0%	-9.3%
1.1442	1.2225	160.9534	-25.2%	-33.5%	-11.6%
1.157	1.2434	145.1378	-25.0%	-32.0%	-18.6%
1.2964	1.4447	193.1662	-9.5%	-13.7%	2.8%
1.2548	1.4025	178.5701	-11.2%	-15.6%	-0.7%
1.2037	1.3196	160.8833	-15.7%	-18.5%	2.7%
1.3685	1.5891	162.8133	-8.1%	-9.1%	-32.6%
1.315	1.5001	164.5422	-13.2%	-13.8%	-38.3%
1.1954	1.3056	174.6588	-37.8%	-44.4%	-32.1%
1.1524	1.2489	205.4501	-25.6%	-33.7%	-26.0%
1.1741	1.2913	209.3798	-11.2%	-13.9%	-22.0%
1.165	1.266	216.4698	-10.5%	-13.0%	-23.0%
1.1965	1.3418	257.7243	-14.2%	-10.6%	-13.7%
1.2203	1.3865	273.8380	-11.4%	-6.3%	-15.0%
1.2182	1.3684	259.4397	-9.1%	-8.1%	-15.9%
1.1563	1.2615	186.8006	-11.2%	-16.8%	-7.3%
1.1689	1.3037	188.8080	-10.9%	-14.0%	-7.3%
1.176	1.2886	190.9809	-5.6%	-10.1%	-8.6%
1.211	1.3498	227.8056	3.3%	4.0%	-3.4%
1.1966	1.3492	229.9907	-3.7%	-3.3%	-3.1%
1.1834	1.3022	238.4092	3.8%	4.4%	-7.6%
1.173	1.2922	273.2086	-2.8%	-6.1%	-4.5%
1.1955	1.3384	272.6668	-8.5%	-11.1%	-5.2%
1.2227	1.3572	272.6295	-1.5%	-4.5%	-0.2%

**Tabela C. 7-** Variação percentual do dano para o aperto de 6 kN

6 kN			Variação %		
Fd	Fda	F. Axial [N]	Fd	Fda	F. Axial [N]
1.1441	1.2248	162.6268	-12.4%	-16.4%	-1.4%
1.136	1.2137	157.2665	-18.3%	-24.2%	-5.9%
1.1313	1.2004	161.2974	-15.8%	-22.7%	0.5%
1.1356	1.2197	151.7714	-22.9%	-20.7%	-18.5%
1.1661	1.248	157.2632	-22.9%	-30.8%	-14.2%
1.2184	1.3393	144.4269	-18.7%	-22.6%	-19.2%
1.2633	1.4237	183.3757	-12.3%	-15.3%	-2.4%
1.2	1.3146	175.5080	-16.3%	-23.3%	-2.4%
1.3716	1.5343	160.0581	-1.5%	-1.9%	2.2%
1.3998	1.6149	163.5866	-5.6%	-7.3%	-31.9%
1.3537	1.5697	169.2459	-10.0%	-8.8%	-34.5%
1.3964	1.6471	174.6478	-18.0%	-14.5%	-32.1%
1.3982	1.6879	197.4280	-3.5%	1.1%	-31.2%
1.314	1.5147	204.6456	0.6%	2.9%	-24.8%
1.3698	1.6797	209.2788	6.0%	14.8%	-27.2%
1.2588	1.4628	269.6118	-8.6%	-1.5%	-8.7%
1.2252	1.3774	268.6663	-10.9%	-7.0%	-17.2%
1.2849	1.4797	257.1505	-3.4%	0.0%	-17.0%
1.2765	1.4437	184.1728	-0.7%	-2.1%	-8.9%
1.3219	1.4934	189.2022	1.9%	0.4%	-7.1%
1.2666	1.4669	192.7502	2.0%	3.3%	-7.6%
1.2278	1.4075	234.6737	4.7%	7.9%	-0.3%
1.2483	1.4103	233.8086	0.6%	1.2%	-1.4%
1.2587	1.4312	241.7992	9.6%	13.0%	-6.1%
1.2746	1.4785	270.0980	5.4%	7.2%	-5.7%
1.2856	1.4639	272.8495	-0.9%	-1.6%	-5.1%
1.258	1.4268	274.6884	1.3%	0.6%	0.5%

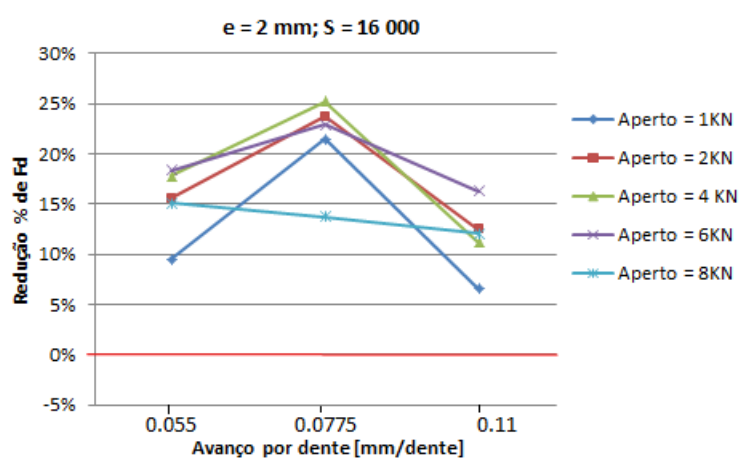
*Anexo C - Resultados Experimentais*

**Tabela C. 8-** Variação percentual do dano para o aperto de 8 kN

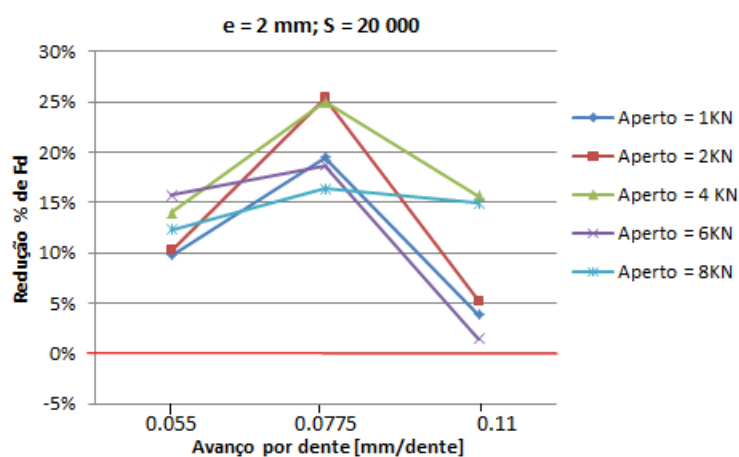
8 kN			Variação %		
<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial [N]</b>	<b>Fd</b>	<b>Fda</b>	<b>F. Axial [N]</b>
1.1332	1.2176	166.5352	-13.4%	-17.1%	1.0%
1.1676	1.264	155.0695	-15.1%	-19.2%	-7.4%
1.1665	1.2469	160.9807	-12.3%	-18.1%	0.3%
1.2653	1.4143	154.9762	-10.3%	-4.1%	-16.0%
1.2602	1.3979	152.7384	-13.7%	-16.7%	-17.6%
1.2425	1.3574	146.4563	-16.4%	-20.9%	-17.5%
1.2636	1.4134	189.3899	-12.3%	-16.2%	0.8%
1.2456	1.3644	176.2875	-12.0%	-18.8%	-2.0%
1.2109	1.3095	167.3227	-15.0%	-19.4%	6.5%
1.5253	1.9118	173.3329	3.0%	9.4%	-24.5%
1.4604	1.747	171.6916	-1.9%	2.2%	-32.6%
1.4773	1.7857	171.4025	-11.5%	-5.6%	-34.6%
1.3139	1.5042	208.9995	-10.1%	-11.0%	-23.9%
1.3309	1.5575	214.0451	1.9%	5.5%	-19.3%
1.2701	1.3914	217.1362	-1.4%	-2.8%	-22.6%
1.6417	1.9081	263.7836	16.8%	22.2%	-11.1%
1.5794	1.8245	273.6852	13.9%	19.2%	-15.1%
1.6275	1.8247	274.9999	18.3%	18.9%	-9.4%
1.2698	1.4473	204.5898	-1.2%	-1.8%	2.0%
1.1885	1.3545	197.8838	-9.1%	-9.8%	-2.4%
1.1898	1.34	205.1709	-4.3%	-5.9%	-1.1%
1.288	1.4532	233.8680	9.1%	10.8%	-0.7%
1.1899	1.3249	243.6745	-4.3%	-5.2%	2.7%
1.2089	1.3442	243.0842	5.9%	7.4%	-5.5%
1.2379	1.4027	278.0442	2.6%	2.2%	-2.7%
1.2418	1.4049	283.0699	-4.4%	-5.8%	-1.3%
1.2641	1.4253	266.6818	1.8%	0.5%	-2.4%

## RESULTADOS

### RESULTADOS DO PROVETE DE 2 MM DE ESPESSURA



a)

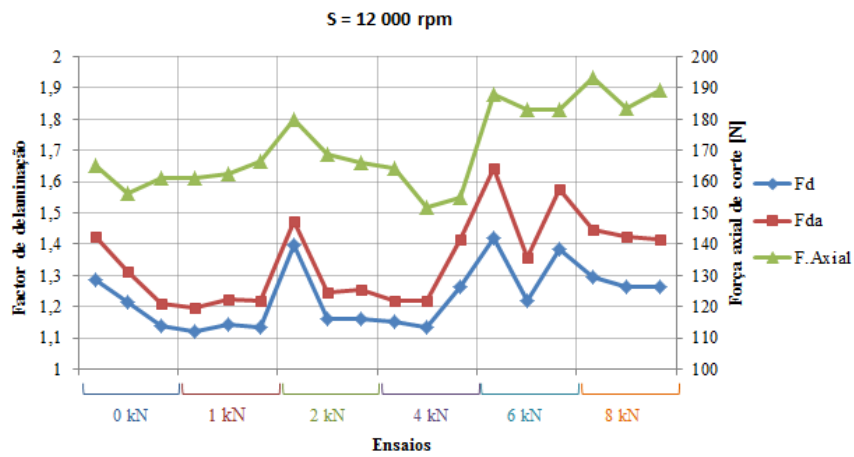


b)

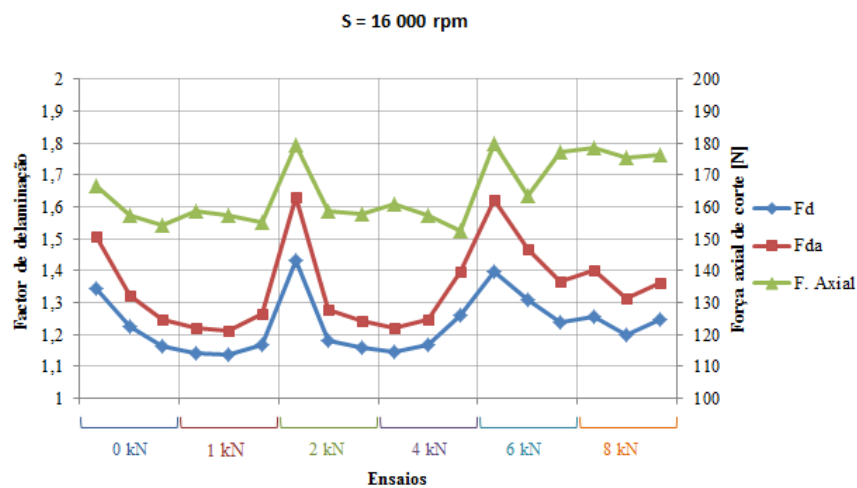
**Figura D. 1-** Redução percentual do dano com a variação do avanço para o provete de 2 mm:  
a) S = 16 000 rpm; b) S = 20 000 rpm



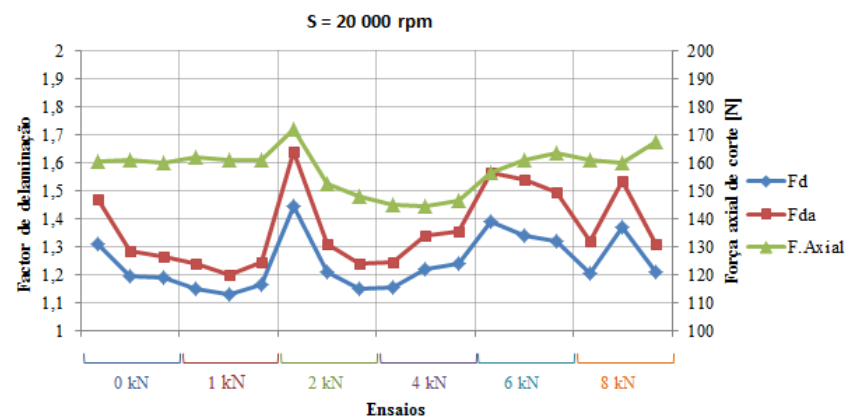
## Anexo D - Resultados



a)



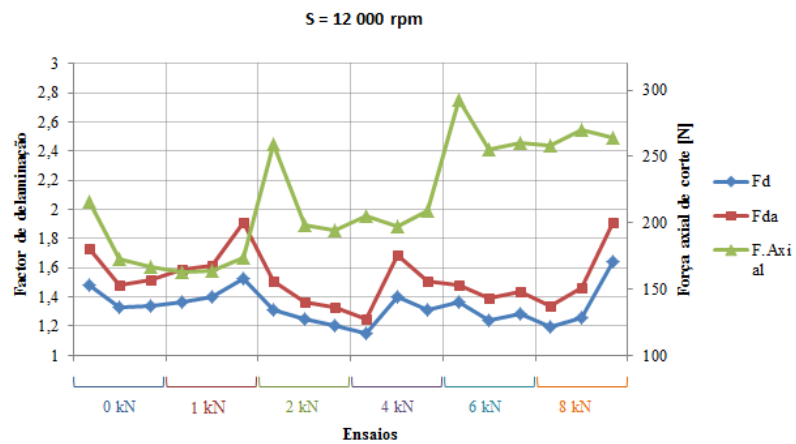
b)



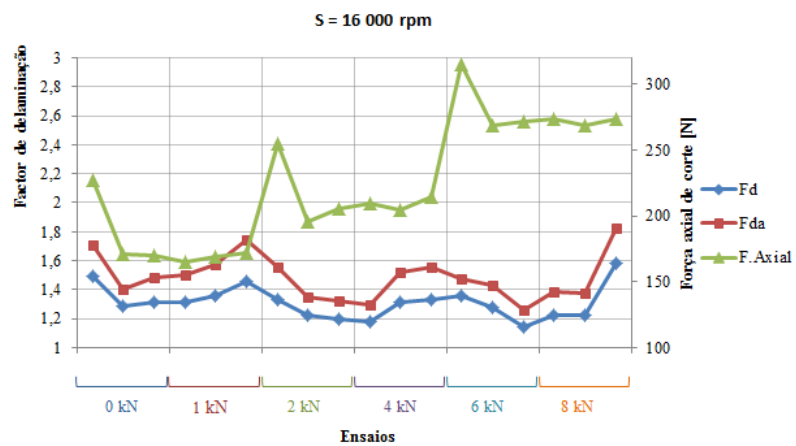
c)

**Figura D. 2-** Variação dos factores de delaminação e Força Axial para diferentes velocidades ao longo do aperto: a)  $S = 12\,000$  rpm; b)  $S = 16\,000$  rpm; c)  $S = 20\,000$  rpm

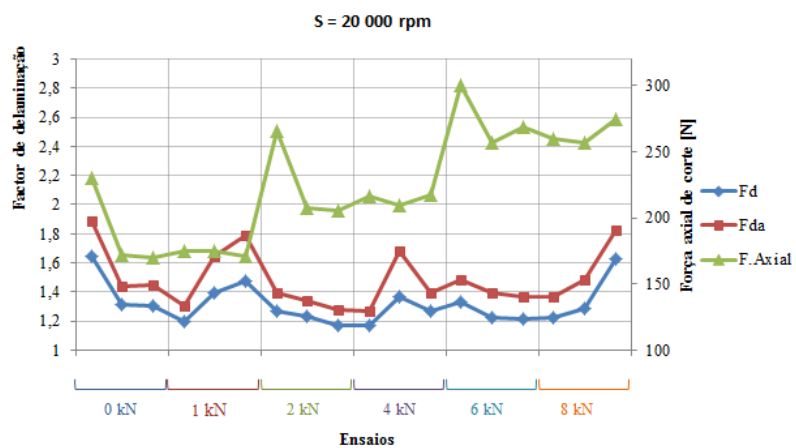
RESULTADOS DO PROVETE DE 4MM DE ESPESSURA



a)



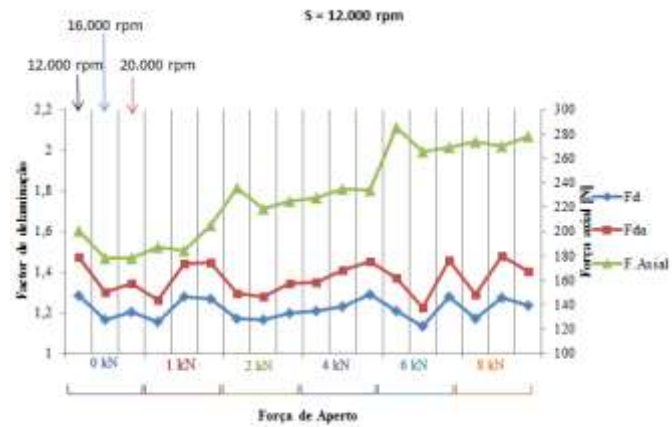
b)



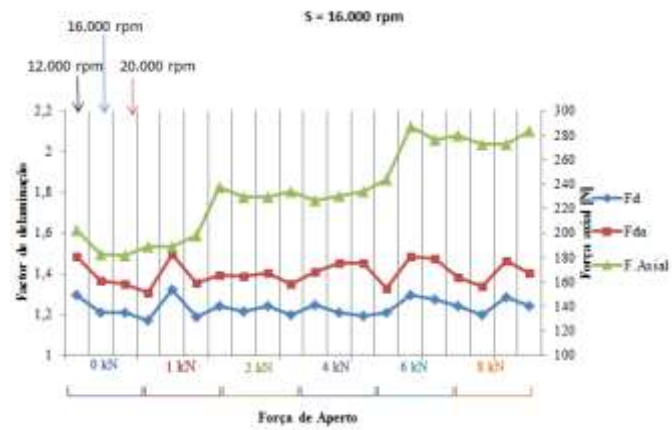
c)

**Figura D. 3-** Variação dos factores de delaminação e Força Axial para diferentes velocidades ao longo do aperto: a)  $S = 12.000$  rpm; b)  $S = 16.000$  rpm; c)  $S = 20.000$  rpm

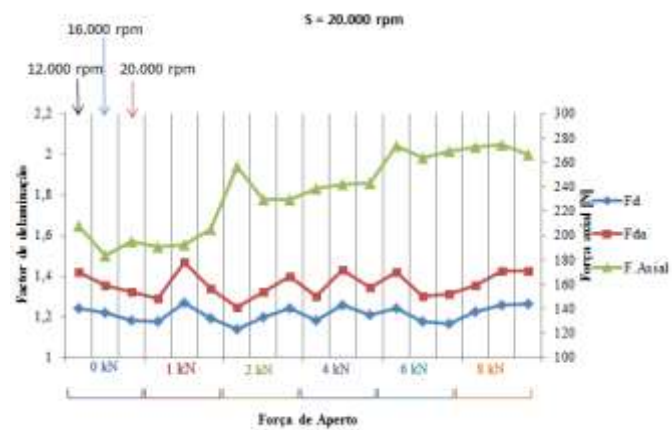
RESULTADOS DO PROVETE DE 6 MM DE ESPESSURA



a)



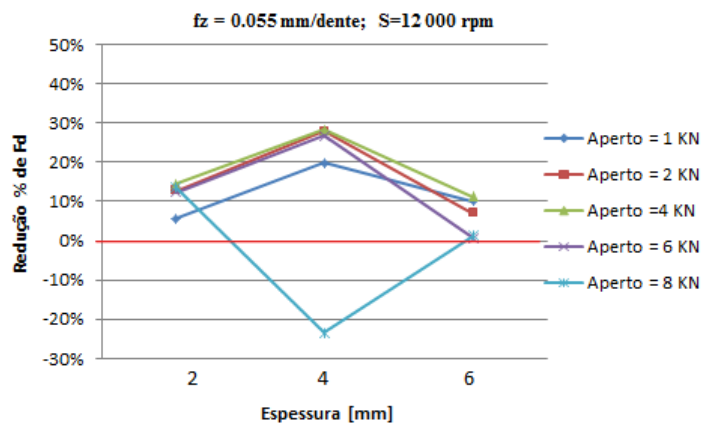
b)



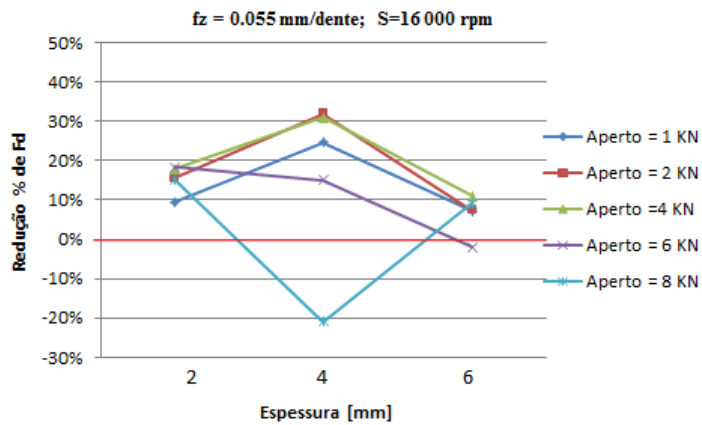
c)

**Figura D. 4-** Variação dos factores de delaminação e Força Axial para diferentes velocidades ao longo do aperto: a)  $S = 12\ 000\ \text{rpm}$ ; b)  $S = 16\ 000\ \text{rpm}$ ; c)  $S = 20\ 000\ \text{rpm}$

## RESULTADOS DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA

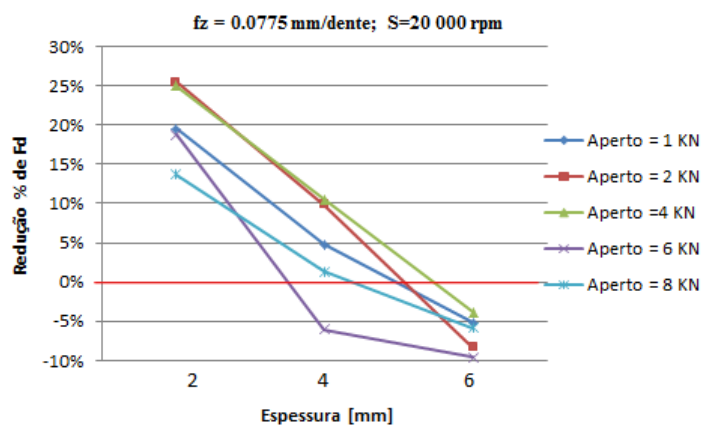


a)

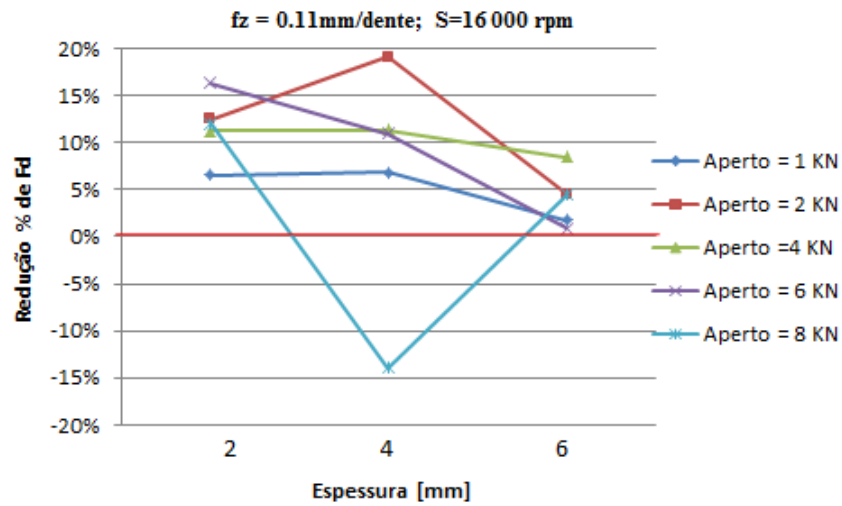


b)

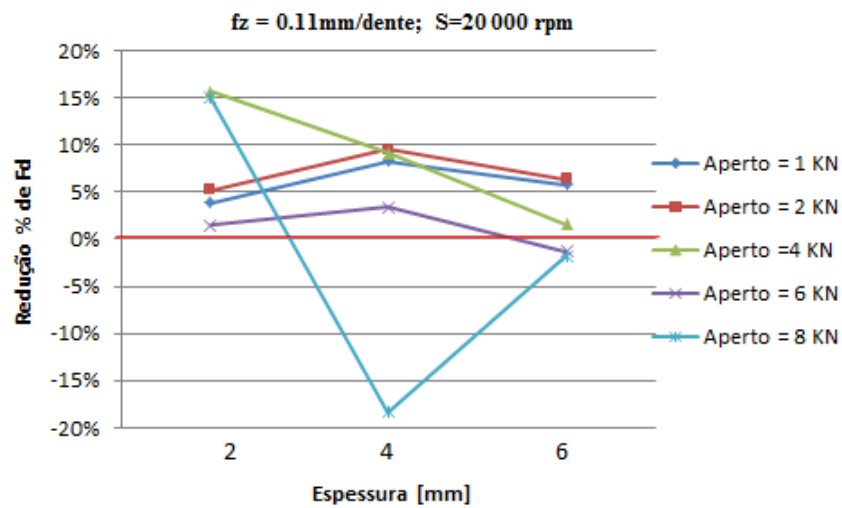
**Figura D. 5-** Redução percentual do dano com a variação da espessura e avanço de 0.055 mm/dente: a)  $S = 12\ 000 \text{ rpm}$ ; b)  $S = 16\ 000 \text{ rpm}$



**Figura D. 6-** Redução percentual do dano com a variação da espessura e avanço de 0.0775 mm/dente com utilização da velocidade de rotação de 20 000 rpm



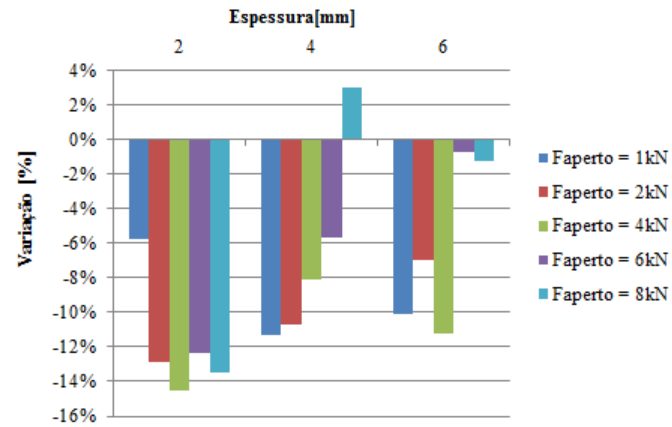
a)



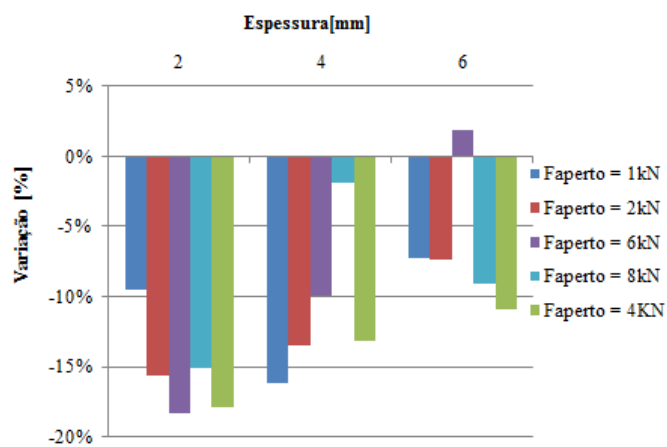
b)

**Figura D. 7-** Redução percentual do dano com a variação da espessura e avanço de 0.11 mm/dente com utilização da velocidade de rotação de 16 000 e 20 000 rpm

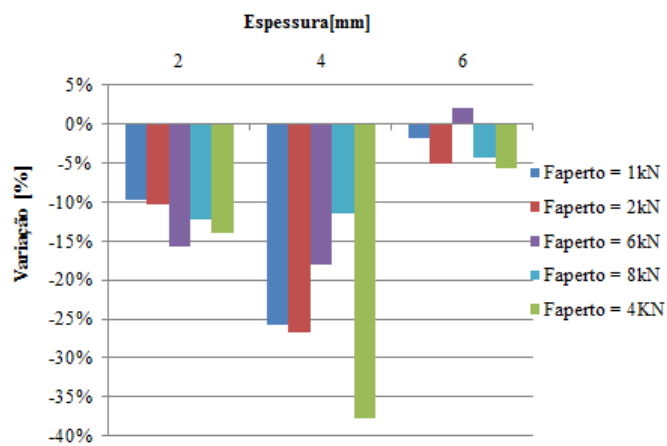
## Anexo D - Resultados



a)



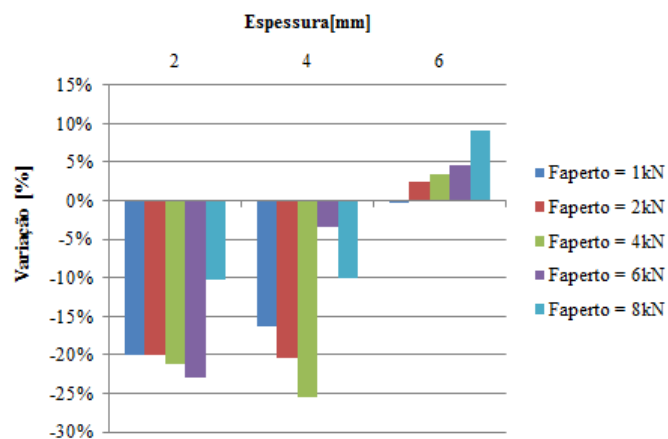
b)



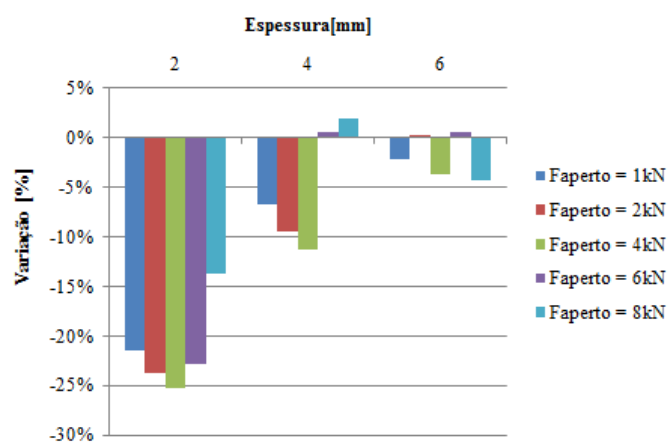
c)

**Figura D. 8-** Variação percentual do dano com a variação da espessura com utilização do avanço de 0.055 mm/dente: a)  $S = 12\,000$  rpm; b)  $S = 16\,000$  rpm; c)  $S = 20\,000$  rpm

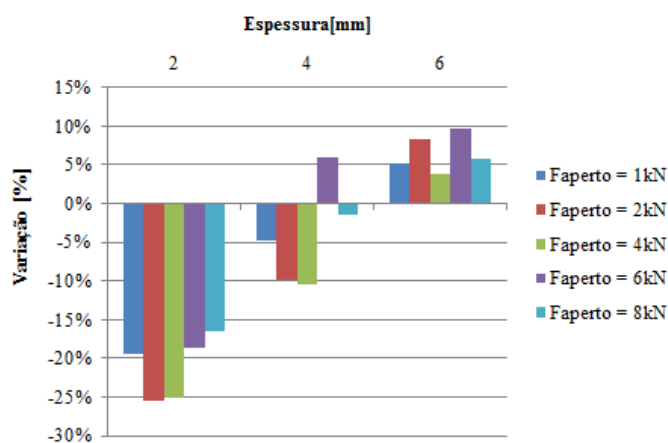
## Anexo D - Resultados



a)

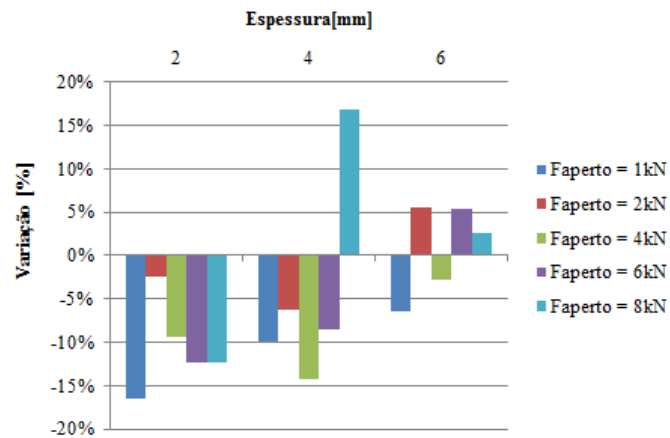


b)

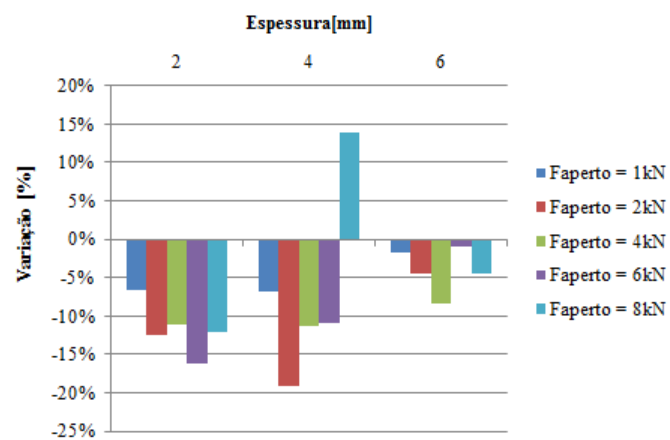


c)

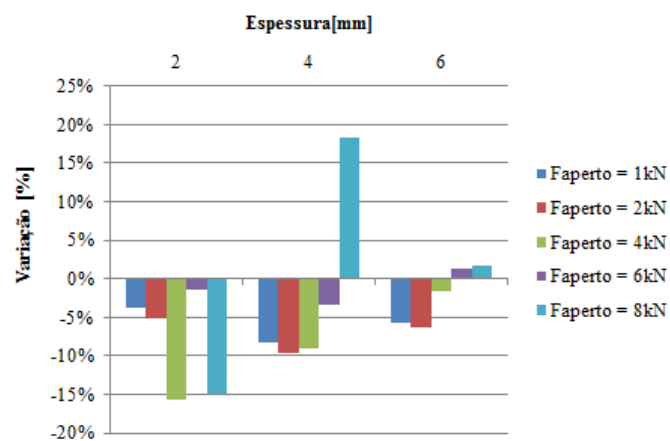
**Figura D. 9-** Variação percentual do dano com a variação da espessura com utilização do avanço de 0.0775 mm/dente: a)  $S = 12\,000$  rpm; b)  $S = 16\,000$  rpm; c)  $S = 20\,000$  rpm



a)



b)



c)

**Figura D. 10-** Variação percentual do dano com a variação da espessura com utilização do avanço de 0.0775 mm/dente: a)  $S = 12\ 000$  rpm; b)  $S = 16\ 000$  rpm; c)  $S = 20\ 000$  rpm